



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**ANALÝZA OBJEMOVÝCH ZMĚN VYBRANÝCH
SILIKÁTOVÝCH KOMPOZITŮ**

ANALYSIS OF SELECTED SILICATE BASED COMPOSITES VOLUME CHANGES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL KUBEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. ZBYNĚK KERŠNER, CSc.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Pavel Kubeš
Název	Analýza objemových změn vybraných silikátových kompozitů
Vedoucí práce	prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Vedoucí-specialista	doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Vedoucí-specialistka	Ing. Barbara Kucharczyková, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (731201) Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, 2011.
- COLLEPARDI, M. Moderní beton. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2009.
- NAVRÁTIL, J. Předpjaté betonové konstrukce. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- FRANTÍK, P. MAŠEK, P. GTDiPS software, <http://gtdips.kitnarf.cz/>, 2015.

Další podklady podle pokynů vedoucího práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Studium doporučených podkladů a souvisejících materiálů, průzkum webových zdrojů, orientace v problematice smršťování především cementových kompozitů, vyhodnocení výpočetně i experimentálně zjištěných objemových změn těles z vybraných kompozitů, diskuse výsledků, závěrečné shrnutí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou objemových změn vybraných silikátových kompozitů. V první části je představena problematika objemových změn betonu se zaměřením na smršťování, dále jsou představeny dva vybrané modely pro predikci smršťování, popsána konfigurace a průběh laboratorních zkoušek stejně jako postup při zpracování naměřených experimentálních dat. Druhá část obsahuje vstupní data upravená v programu GTDiPS a další vypočítané parametry. Výsledkem práce je zhodnocení vlivu teplotní dilatace na vývoj smršťování mladého betonu. Dalším výstupem je porovnání přesnosti dvou vybraných predikčních modelů vystihnout naměřený průběh smršťování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Objemové změny, poměrné přetvoření, smršťování, beton, silikátový kompozit, žlaby, modely pro predikci smršťování, ČSN EN 1992-1-1, model B4

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis of volume changes of selected silicate based composites. The first part introduces the issue of volume changes of concrete, especially the shrinkage process, two selected models for shrinkage prediction, describes configuration and course of performed tests, as well as the processing of measured experimental data. The second part contains input data modified by the program GTDiPS and another calculated parameters. The result of the work is the evaluation of the influence of thermal dilation on the development of shrinkage of young concrete. Another output is the comparison of accuracy of the two selected prediction models to capture the course of measured shrinkage.

KEYWORDS

Volume changes, strain, shrinkage, concrete, silicate based composite, moulds, shrinkage prediction models, ČSN EN 1992-1-1, model B4

Analýza objemových změn vybraných silikátových kompozitů: diplomová práce.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky,
2018. 57 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., vedoucí-specialista
byl doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D., vedoucí-specialistka byla Ing. Barbara Kuchar-
czykova, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Brno

.....

Bc. Pavel Kubeš
(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc. za odborné konzultace, ochotu a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Mé poděkování dále patří panu doc. Petru Frantíkovi, Ph.D. za rady k programu GTDiPS a připomínky ke zpracování dat. Děkuji také paní Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. za data z laboratorních zkoušek a fotodokumentaci.

V neposlední řadě děkuji své přítelkyni a rodině za podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

OBSAH

Úvod	12
1 Objemové změny	13
1.1 Smršťování	13
1.1.1 Plastické smršťování	14
1.1.2 Karbonatační smršťování	14
1.1.3 Smršťování vysycháním	14
1.1.4 Chemické smršťování	15
1.1.5 Autogenní smršťování	16
1.1.6 Celkové smrštění	18
1.2 Dotvarování	19
1.3 Teplotní dilatace	19
1.4 Ošetřování betonu	21
2 Vybrané modely pro predikci smršťování	23
2.1 ČSN EN 1992-1-1	23
2.2 Model B4	25
3 Laboratorní zkoušky	30
3.1 Použitý materiál	30
3.2 Měřicí zařízení	30
4 Zpracování naměřených dat	33
4.1 Software	33
4.1.1 MS Excel	33
4.1.2 GTDiPS	33
4.2 Výpočet vybraných parametrů	34
5 Výsledky	36
6 Závěr	44
Literatura	45
Seznam symbolů, veličin a zkratk	46
Seznam příloh	49

A	Protažení ve žlabech	50
A.1	Sada A	50
A.2	Sada C	52
B	Protažení po odformování	54
B.1	Sada A	54
B.2	Sada C	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vliv relativní vlhkosti na protažení betonu	15
1.2	Smrštění betonu s nepropustným obalem	17
1.3	Vývoj chemického a autogenního smrštění	17
1.4	Vývoj relativního autogenního smrštění v závislosti na stupni hydratace	18
1.5	Součinitel teplotní roztažnosti mladého betonu	20
1.6	Vliv ošetřování vodou na smrštění	22
3.1	Schéma měřicího žlabu	31
3.2	Uspořádání měřicích zařízení	31
4.1	GTDiPS – pracovní okno	33
4.2	Funkce součinitele teplotní roztažnosti $\alpha_T(t)$	35
5.1	Tělesa A ve žlabu – průměrná hodnota	36
5.2	Tělesa C ve žlabu – průměrná hodnota	37
5.3	Tělesa po odformování – průměrná hodnota	37
5.4	Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti ve žlabu	38
5.5	Směs C: průběh smrštění a úbytku hmotnosti ve žlabu	39
5.6	Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti po odformování	39
5.7	Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti po odformování	40
5.8	Směs A: srovnání celkového naměřeného smrštění s hodnotami numerických modelů	41
5.9	Směs C: srovnání celkového naměřeného smrštění s hodnotami numerických modelů	42
5.10	Směs C: srovnání naměřeného smrštění po odformování s hodnotami numerických modelů	42
A.1	Smršťování tělesa A1 ve žlabu	50
A.2	Smršťování tělesa A2 ve žlabu	50
A.3	Smršťování tělesa A3 ve žlabu	51
A.4	Smršťování tělesa C1 ve žlabu	52
A.5	Smršťování tělesa C2 ve žlabu	52
A.6	Smršťování tělesa C3 ve žlabu	53
B.1	Smršťování tělesa A1 po odformování	54
B.2	Smršťování tělesa A2 po odformování	54
B.3	Smršťování tělesa A3 po odformování	55
B.4	Smršťování tělesa C1 po odformování	56
B.5	Smršťování tělesa C2 po odformování	56
B.6	Smršťování tělesa C3 po odformování	57

SEZNAM TABULEK

2.1	Hodnoty k_h pro rovnici 2.2	23
2.2	ČSN EN 1992-1-1: Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smršťování vysycháním	24
2.3	Parametry pro smršťování vysycháním pro model B4	26
2.4	Součinitele podle typu kameniva pro model B4	27
2.5	Parametry pro autogenní smršťování pro model B4	27
2.6	Vliv přísad na průběh smršťování pro model B4	28
3.1	Složení směsí a rozměry těles	30
5.1	Použité hodnoty opravých součinitelů pro model B4	43

ÚVOD

Práce se zabývá studiem výsledků laboratorních měření vybraných silikátových kompozitů a následnou analýzou výstupních dat. Testy jsou zaměřeny na určení objemových změn jemnozrnných kompozitů.

Důkladné studium dotvarování, smršťování a teplotních změn objemu je předpokladem pro navrhování a realizaci betonových prvků a konstrukcí. Při opomenutí vlivu objemových změn může dojít k popraskání betonu, snížení pevnosti, ztrátě trvanlivosti, korozi výztuže a v konečném důsledku i kolapsu konstrukce. Přesnost jednotlivých přístupů a modelů používaných pro výpočet smršťování a dotvarování může být zlepšena upřesněním použitých funkcí podle výsledků laboratorních zkoušek.

Cílem této diplomové práce je dle získaných znalostí vyhodnotit data z laboratorních zkoušek, popsat zaznamenané objemové změny před i po odformování a porovnat přesnost predikce vývoje smršťování vybraných matematických modelů – ČSN EN 1992-1-1 a B4.

1 OBJEMOVÉ ZMĚNY

Jednou ze základních vlastností betonu a kompozitů podobného typu je jejich přetvoření.

Nejdůležitějšími reologickými vlastnostmi kompozitů typu beton způsobujícími objemové změny v kompozitu jsou dotvarování a smršťování. Další příčinou změny objemu tělesa je teplota.

Velikost i průběh přetvoření (platí především pro smršťování a dotvarování) závisí zejména na čase, dále na složení směsi, vnějších vlivech (teplota, zatížení, ...) i tvaru a velikosti konstrukce.

1.1 Smršťování

Smršťování je komplexní proces, který je zapříčiněn zráním betonu v běžných podmínkách.

Během zrání betonu v kompozitu probíhají složité chemické reakce cementu s vodou. Tyto reakce souhrnně označujeme jako hydrataci cementu. Beton díky ní přechází ze snadno zpracovatelné, plastické hmoty do mechanicky odolného a pevného materiálu (Collepari, 2009). Hydratace způsobuje mimo mechanických a fyzikálních změn materiálu i objemové změny. Tyto procesy ovlivňují kvalitu betonu a případně i míru jeho porušení trhlinami. Pokud je čerstvému betonu zabráněno volně se deformovat, vzniknou v něm vynucená napětí. Vývoj těchto napětí, v případě smršťování tahových, se v rané fázi tuhnutí betonu střetává s nárůstem pevnosti. Pevnost betonu na počátku zrání je relativně malá, tudíž je kompozit náchylný ke vzniku trhlin.

Smršťování lze popsat jako kontrakci betonu za určitou dobu. Můžeme jej tedy vyjádřit jako závislost smrštění na čase.

Proces smršťování má několik příčin, podle kterých jej lze rozdělit následovně (Holt, 2001):

- plastické smršťování,
- teplotní dilatace,
- karbonatační smršťování,
- smršťování vysycháním,
- chemické smršťování,
- autogenní smršťování.

Plastické smršťování E. Holt pouze zmiňuje. Smršťování se nejčastěji hodnotí po dlouhou dobu (řádově měsíce a roky), tudíž změny v plastickém stádiu betonu považuje za nevýznamné.

Objemové změny způsobené teplotní dilatací jsou popsány v kapitole 1.3.

1.1.1 Plastické smršťování

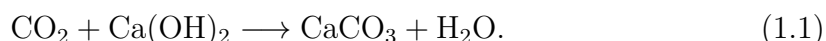
Jde o smršťování způsobené odpařováním vody z ještě nezatvrdělého betonu v plastickém stavu. Tento typ smrštění nastává do 10–12 hodin po uložení a může být vyvolán působením vysoké okolní teploty, větru, nízkou relativní vlhkostí vzduchu (nižší než 95 %) nebo kombinací těchto faktorů (Colleparidi, 2009). Rychle se vypařující voda nemůže být plně nahrazována vodou, která se přemísťuje z vnitřních částí betonu, a v původně zavodněných kapilárách vzniká povrchové napětí v důsledku zakřivení hladiny vody při stěně kapiláry. Toto povrchové napětí následně vyvolá silové působení, které vede ke kontrakci betonu.

Podobným jevem z hlediska vnějšího projevu je „sednutí“ čerstvého betonu. Působení gravitačních sil na čerstvou směs v tomto případě nahrazuje vliv kapilárních sil. Sedání lze zamezit použitím výztužných vložek, tím však vznikne tahové napětí a možnost tvorby trhlin v čerstvém betonu (Navrátil, 2008). Ke změně objemu může docházet i v důsledku dohutňování betonu.

Plastickému smršťování lze obecně zabránit vhodným návrhem směsi, ošetřováním a kvalitním zhutněním čerstvého betonu.

1.1.2 Karbonatační smršťování

Karbonatace betonu je chemický proces, jehož důsledkem je především koroze ocelové výztuže. Krycí vrstva výztuže má vysoké pH a tím ji chrání proti korozi. V průběhu času se do betonu dostává vzdušný oxid uhličitý a reaguje s hydroxidem vápenatým, který vzniká v betonu hydratačním procesem cementu:



S postupným pronikáním oxidu uhličitého do betonu ubývá hydroxid vápenatý a tím dochází ke snížení hodnoty pH krycí vrstvy. Snížení pH betonu negativně ovlivňuje zejména trvanlivost železobetonu – v momentě, kdy pH klesne pod určitou mez, přestává beton chránit výztuž proti korozi.

Mimo koroze ocelové výztuže je karbonatace rovněž příčinou i určitého smrštění betonu. Jeho velikost je však v porovnání s ostatními typy smršťování nevýznamná, a tak již nebude dále bráno v úvahu.

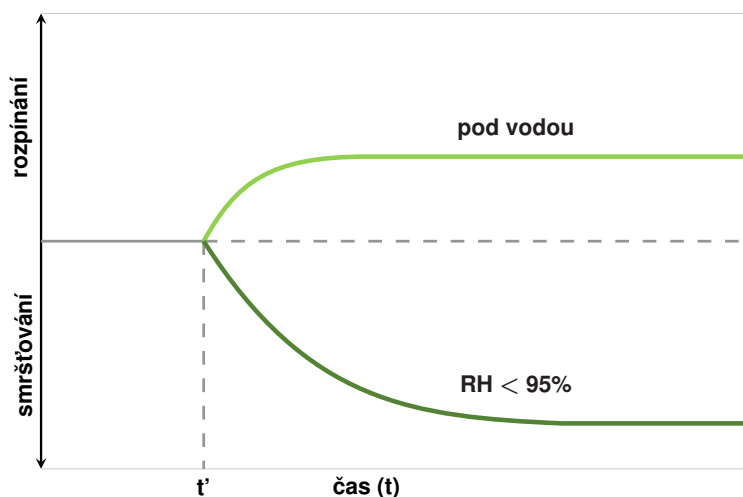
1.1.3 Smršťování vysycháním

Smršťováním vysycháním se rozumí snížení objemu betonu v důsledku ztráty vody z již ztvrdělého betonu. Z počátku se vypařuje voda, která se na povrch dostane důsledkem usazování těžších částí kameniva. Jakmile zmizí, beton bude i nadále podléhat vysychání a přebytečná voda bude vytažena z vnitřku betonové hmoty.

Nejběžnější situací vyplývající ze smrštění vysycháním v raném věku je výskyt povrchového praskání. Současně může docházet k problému s vnitřním napětím nebo praskáním kvůli nasávání vody do bednění nebo podkladového materiálu.

Mechanismy vysychání způsobující smrštění jsou závislé na velikosti vnitřních pórů. Velikost smršťování vysycháním silně závisí na množství ztracené vody a rychlosti odpařování. Pokud rychlost přesunu vody na povrch bude vyšší než rychlost odpařování, přebytečná voda bude působit jako ochrana. V takovém případě nedojde k žádnému smrštění, protože na povrchu je dostatek vody, aby se umožnilo odpařování, aniž by se z vnitřních kapilárních pórů vytáhla voda (Holt, 2001). Část dlouhodobého smrštění od vysychání může být reverzibilní, protože beton bude bobtnat po opětovném navlhčení.

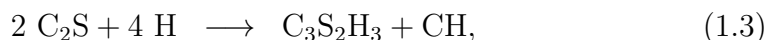
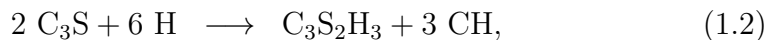
Pokud bude beton vystaven vysychání v prostředí s relativní vlhkostí menší než 95 %, projeví se smrštění vysycháním, které bude probíhat po celou dobu jeho životnosti. Bude-li však beton uložen pod vodou, nastane naopak bobtnání (obr. 1.1). Velikost expanze je ovšem velmi malá, stejně jako vyvolané napětí, proto nedochází ke vzniku trhlin.



Obr. 1.1 Vliv relativní vlhkosti (RH) na protažení betonu (Colleparidi, 2009)

1.1.4 Chemické smršťování

Chemické smrštění je výsledkem reakcí mezi cementem a vodou, které vedou ke snížení objemu směsi. Cement je složka v betonu poskytující chemické reakce pro stmelení hmoty. Základní reakce cementového slínku jsou v dnešní době již dobře známy a obecně definované následujícími symbolickými rovnicemi fází slínku – převzato z Holt (2001), podle Paulini (1992), Lea (1998):



Vzhledem k tomu, že chemické smrštění je založeno pouze na rozdílu objemů počátečních a konečných produktů těchto rovnic, je možné jej spočítat na základě molárních hmotností. Obecná rovnice pro chemické smrštění je uvedena níže. Komplikace výpočtu spočívá v tom, že je často obtížné zjistit přesný objem různých složek v betonu, aniž by byly provedeny komplikované testy.

$$CS = \frac{(V_C + V_W) - V_{hy}}{V_{Ci} + V_{Wi}} \cdot 100 \quad (1.6)$$

kde CS = chemické smrštění,

V_{Ci} = objem cementu před smícháním,

V_C = objem hydratovaného cementu,

V_{Wi} = objem vody před smícháním,

V_W = objem reakční vody,

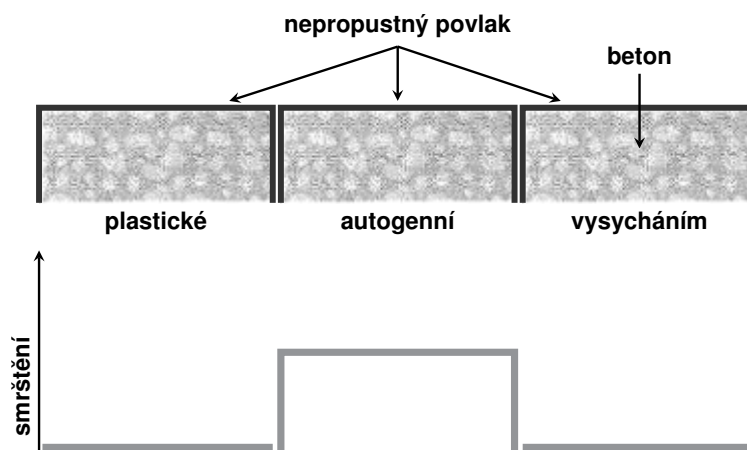
V_{hy} = objem hydratačních produktů.

Chemické smrštění cementové pasty není ovlivněno vodním součinitelem. Vodní součinitel a jemnost cementu ovlivní pouze rychlost chemického smršťování. Konečná velikost smršťování se stupněm hydratace blížícím se 100 % bude ovlivněna pouze chemickým složením cementu. Je třeba poznamenat, že uvedené rovnice 1.2–1.5 jsou velmi obecnou aproximací pro reakce slinku. Ve skutečnosti jsou tyto rovnice mnohem komplexnější. V uvedených výpočtech se mohou projevit také některé nesrovnalosti týkající se hustoty produktů reakcí. Tyto nesrovnalosti jsou způsobeny obtížným měřením čistých sloučenin (Holt, 2001).

1.1.5 Autogenní smršťování

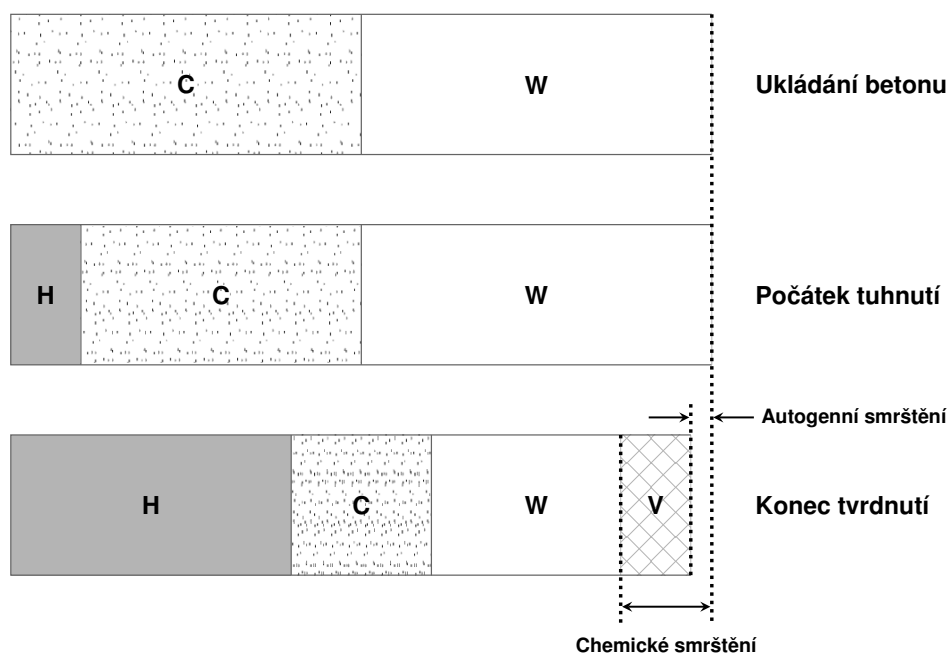
Autogenní smršťování je definováno jako makroskopická změna objemu, k níž dochází bez výměny vlhkosti s okolím. Jedná se o důsledek chemického smršťování.

Porovnání autogenního smršťování se smršťováním plastickým a smršťováním od vysychání můžeme vidět na následujícím obrázku. Každý ze tří sloupců zobrazuje velikost daného typu smrštění u betonu, který je obalen nepropustnou fólií (je tedy zabráněno výměně vody mezi betonem a okolím). Nedojde tak ani k plastickému smrštění, ani ke smrštění způsobenému vysycháním.



Obr. 1.2 Smrštění betonu s nepropustným obalem (Collepari, 2009)

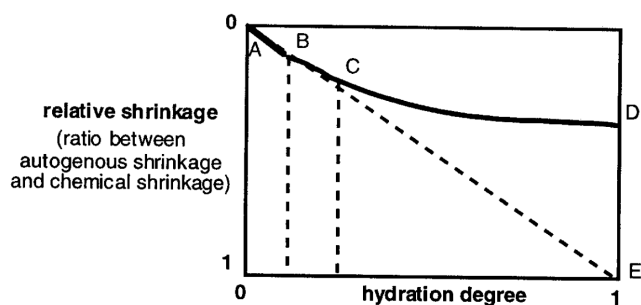
Grafické znázornění změn složení uzavřeného betonu v důsledku hydratačních reakcí cementu je uvedeno na obr. 1.3. Tento obrázek ukazuje, že autogenní smrštění je částí smrštění chemického. Zatímco chemické je redukcí vnitřního objemu, autogenní smrštění je změnou vnějšího objemu. Proto je možné autogenní smrštění měřit jako změnu délky.



Obr. 1.3 Grafické znázornění vývoje chemického a autogenního smrštění (C = nehydratovaný cement, W = voda, H = hydratační produkty, K = kapiláry), vlastní zpracování, podle Holt (2001)

Autogenní smršťování probíhá ve třech fázích, které jsou vyobrazeny na obrázku 1.4. Bezprostředně po smíchání vody s cementem se projeví chemické smrštění. V této první fázi, kdy se čerstvý beton chová jako kapalina, je autogenní smrštění ekvivalentní chemickému smrštění – přímo úměrné stupni hydratace (sekce AB na obrázku). To značí, že v této fázi je zapříčiněno pouze chemickým smršťováním. Jakmile se začne formovat skelet, chemickému smrštění je bráněno (sekce BC). Za bodem C je materiál tuhý a chemické smrštění zaujímá nižší a nižší podíl na autogenním smrštění. Další snižování objemu je způsobeno jen samovysycháním.

Samovysychání se projevuje po delší dobu než chemické smršťování a nezačíná ihned po odlití. Jde o snižování objemu vnitřní chemicky nevázané vody, kterou odebírá cement za účelem hydratace (Holt, 2001). K samovysychání dochází postupně v celém objemu neošetřovaného betonu. U betonu s vysokou pevností a nižším vodním součinitelem je velikost autogenního smrštění větší. V těchto případech může být velikost autogenního smrštění stejná jako velikost smrštění vysycháním.



Obr. 1.4 Vývoj relativního autogenního smrštění v závislosti na stupni hydratace (Holt, 2001)

1.1.6 Celkové smrštění

Celkové smrštění by mělo být součtem každé jednotlivé změny objemu způsobené karbonatací, tepelnou expanzí, vysycháním a autogenní deformací. Vzhledem k tomu, že velká část tepelné expanze je reverzibilní, není obvykle do velikosti celkového smrštění zahrnuta.

V praxi se nejčastěji používá výpočet pro konečnou hodnotu smršťování. To je však chybné, jelikož smrštění v prvních hodinách či dnech může někdy vyrovnat standardní dlouhodobý test nebo jej dokonce překračovat.

U betonu normální pevnosti s vodním součinitelem větším než $w/c = 0.42$ [–] se autogenní smršťování často nedetekuje. Je to způsobeno dostatkem vody pro plnou hydrataci betonu. Naopak u betonu s vysokou pevností s vodním součinitelem nižším než 0.42, je pravděpodobnost autogenního smršťování přispívajícího ke konečnému

smrštění vysoká. V praxi podíl smrštění vysycháním a autogenního smrštění na celkové míře smrštění ve většině případů nelze snadno predikovat, zejména v raném věku a u vysokopevnostních betonů (Holt, 2001).

1.2 Dotvarování

Podstata procesu dotvarování betonu je dána chováním cementového gelu, ve kterém se vyskytuje voda vázaná, voda kapilární a voda v mikropórech. Dlouhodobým působením napětí je voda z mikropórů vytlačována do kapilár, odkud se vypařuje. Dochází tedy k postupnému přenášení napětí z viskózního prostředí na jeho pružný skelet, přičemž se realizuje přetvoření od dotvarování (Navrátil, 2008). Při neměnném zatížení postupně roste deformace namáhaného prvku. Pokud by bylo napětí udržováno po velmi dlouhou dobu, blížila by se hodnota dotvarování asymptoticky k hodnotě konečného dotvarování. Dalším aspektem dotvarování je relaxace. Relaxace je klesající průběh napětí v čase při konstantním deformačním zatížení. Zmíněné jevy mohou vést k nadměrným dlouhodobým deformacím konstrukcí, případně ztrátě předpětí u předpjatého betonu. Následkem mohou být velmi nákladné sanace staveb a v nejhorším případě i jejich kolaps (Bažant et al., 2015).

Dotvarování lze rozdělit na základní (čisté) dotvarování a dotvarování od vysychání. Dotvarování vysycháním je speciální kontrakce betonu, která je způsobena vytlačení vody z cementové pasty vlivem napětí. Tento úbytek vody přispívá k úbytku způsobenému vysycháním (Colleparidi, 2009).

1.3 Teplotní dilatace

Teplotní dilatací se myslí objemové změny, ke kterým dochází, když těleso prochází teplotními výkyvy. Často se označuje jako teplotní roztažnost, jež nastává při stoupaní teploty. Při poklesu teploty naopak dochází ke kontrakci tělesa.

Dilatace může nastat v důsledku zahřátí nebo ochlazení kdykoli během životnosti tělesa. V betonu změnu teploty však nezpůsobuje jen okolní prostředí. V čerstvém betonu se teplota mění díky hydrataci cementu. Obecně platí, že toto rané hydratační teplo je asi 5 až 8 °C adiabatického nárůstu teploty na 45 kg cementu (Holt, 2001). Například maltová směs bude oproti betonové směsi generovat mnohem větší teplo, protože je bohatší na cement. Za běžných podmínek se růst tepla vyskytuje v prvních 12 hodinách za běžných podmínek. V další fázi, kdy se beton ochlazuje, dochází ke smrštění konstrukce.

Během raného věku budou rozdílné teploty uvnitř betonu způsobovat tepelné namáhání. Vnější povrch bude mít díky výměně tepla s okolním prostředím tep-

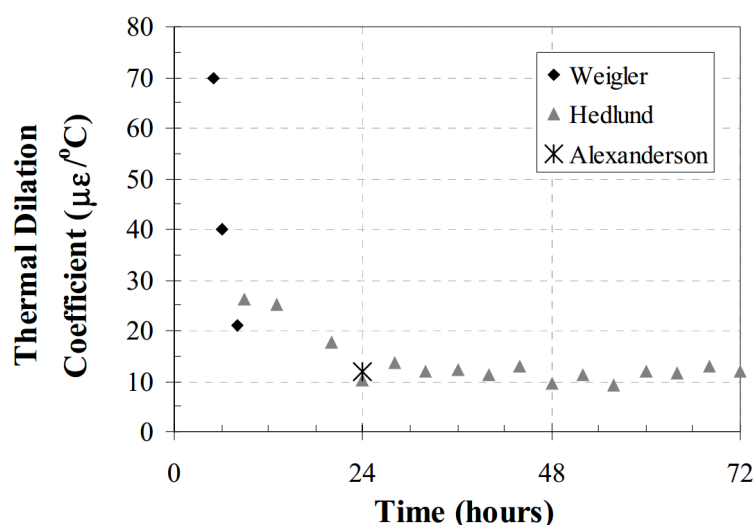
lotu odlišnou od vnitřku. Pokud nelze dosáhnout teplotní rovnováhy, vzniká napětí a riziko praskání. Uvedené riziko je největší u masivních betonových konstrukcí (tj. > 1 metr tloušťky), protože dosažení teplotní rovnováhy trvá mnohem déle.

V dlouhodobém časovém horizontu je tepelná dilatace typicky následkem teplotních výkyvů okolního prostředí. Beton může opět prasknout, pokud bude rychlost expanze nebo kontrakce příliš vysoká. Tyto změny jsou do určité míry závislé na množství volné vody v betonu, protože voda při mrazu a tvorbě ledu musí expandovat.

Každá látka má součinitel teplotní roztažnosti α_T [K^{-1}]. Prodloužení tělesa Δl je přímo úměrné počáteční délce l_0 a přírůstku teploty ΔT , přičemž konstantou úměrnosti je právě součinitel teplotní roztažnosti:

$$\Delta l = \alpha_T \cdot l_0 \cdot \Delta T. \quad (1.7)$$

U betonu závisí součinitel teplotní roztažnosti na vlastnostech jednotlivých materiálů. V raném věku se součinitel s tuhnutím betonových zrn rychle mění. Výzkum provedený Hedlundem (1996) poskytl hodnoty součinitele teplotní roztažnosti mladého betonu v závislosti na čase. Tyto hodnoty, doplněné výsledky získanými Weiglerem a Alexandersonem (Byfors, 1980), jsou uvedeny na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Součinitel teplotní roztažnosti mladého betonu (Holt, 2001)

Součinitel teplotní deformace betonu se po 24 hodinách ustálí na hodnotě přibližně $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Pro srovnání – součinitel teplotní roztažnosti vody při 23°C je $237 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

1.4 Ošetřování betonu

Pokud není beton vhodně ošetřován, vysychá. Při vysychání nemusí plně hydratovat a nedosáhne proto takové pevnosti, jaké by dosáhnout mohl. Při nedostatečné hydrataci povrchové vrstvy zůstane tato vrstva pórovitá, nechrání výztuž před vlivy prostředí a klesá trvanlivost betonu. Ošetřování betonu je nutné i kvůli redukci smrštění. Pokud je smrštění od vysychání vázané a tahové napětí překročí tahovou pevnost materiálu, beton popraská. Vlivem tohoto procesu dochází ke snížení trvanlivosti betonu.

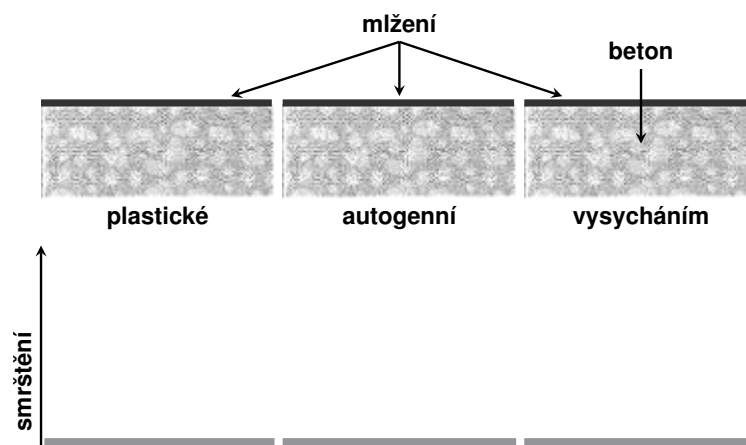
Jak pevnost betonu, tak jeho trvanlivost úzce souvisí se stupněm hydratace cementu α_h (Colleparidi, 2009). Čím vyšší je α_h , tím nižší je kapilární pórovitost V_p :

$$V_p = 100 \cdot w/c - 36,15 \cdot \alpha_h. \quad (1.8)$$

Pro zlepšení pevnosti a trvanlivosti je třeba snížit kapilární pórovitost, což lze provést snížením vodního součinitele a vhodnou ochranou povrchu betonu před odpařováním vody.

Na základě druhu ošetřování rozlišujeme ošetřování vodou a zabránění odparu vody (membránové ošetřování). Vlhké ošetřování může být realizováno trvalým postřikem, ponořením, nebo přikrytím povrchu pravidelně vlhčenými rohožemi. U průmyslových betonových podlah musí být zakrytí povrchu nebo mlžení provedeno co nejdříve po zahlazení povrchu. Ošetřování betonu nepropustnými membránami brání odpaření volné vody z povrchu betonu. Tento druh ošetřování může být provedeno různými metodami. Mezi ty patří pokrytí povrchu betonu fólií, nebo nanesení ochranných postřiků. U aplikace obou uvedených způsobů je nutné zohlednit složení betonu a okolní podmínky během ošetřování. Čím rychlejší odpařování se očekává (nízká relativní vlhkost, oslunění, silný vítr), tím delší musí být minimální doba ošetřování.

Vliv nepropustné ochrany na smrštění jsme již mohli vidět na obr. 1.2. Působení ošetřování vodou je schematicky znázorněno na obr. 1.6:



Obr. 1.6 Vliv ošetřování vodou na smrštění (Collepardi, 2009)

2 VYBRANÉ MODELY PRO PREDIKCI SMRŠŤOVÁNÍ

Stejně jako v minulosti i v současné době pokračuje snaha o výstižné vyjádření smršťování a dotvarování. Je využíváno matematických a statistických metod pro zpracování rozsáhlých souborů experimentálních výsledků a existuje několik odlišných přístupů.

V České republice jsou stále nejpožívanějším přístupem vztahy uvedené v platné normě – ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2). Model B4 (Bažant et al., 2015) je nejnovějším predikčním modelem pro smršťování, dotvarování a jejich kombinaci. Z těchto důvodů byly jako zástupci reologických modelů pro srovnání s naměřenými hodnotami vybrány právě tyto dva modely.

2.1 ČSN EN 1992-1-1

Celkové poměrné přetvoření od smršťování ε_{cs} se skládá ze dvou částí, poměrného smršťování vysycháním ε_{cd} a poměrného autogenního smršťování ε_{ca} :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}. \quad (2.1)$$

Vývoj poměrného smršťování vysycháním v čase vyplývá ze vztahu

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_0) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}, \quad (2.2)$$

kde k_h je součinitel tvaru průřezu a závisí na náhradním rozměru průřezu h_0 podle tabulky 2.1, $\beta_{ds}(t, t_0)$ je funkce popisující průběh smrštění od vysychání v čase, t je stáří betonu ve dnech a t_0 stáří betonu na začátku smršťování (obvykle je to na konci ošetřování betonu) a $\varepsilon_{cd,0}$ představuje neomezené poměrné smršťování vysycháním.

$$\beta_{ds}(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + 0.04 \cdot \sqrt{h_0^3}}. \quad (2.3)$$

h_0 (mm)	k_h
100	1.00
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

Tab. 2.1 Hodnoty k_h pro rovnici 2.2

$$h_0 = 2 A_c / u_0, \quad (2.4)$$

A_c je plocha průřezu a u_0 část obvodu průřezu vystavená vysychání. Hodnotu $\varepsilon_{cd,0}$ lze stanovit z tabulky 2.2 nebo dle vztahu 2.5:

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ [MPa]	Relativní vlhkost (v %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

Tab. 2.2 Jmenovité hodnoty neomezeného poměrného smršťování vysycháním $\varepsilon_{cd,0}$ (v ‰) betonu s cementem třídy N

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp \left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}, \quad (2.5)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right], \quad (2.6)$$

kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku [MPa],

$f_{cmo} = 10$ MPa,

α_{ds1} je součinitel závislý na třídě cementu:

= 3 pro cement třídy S,

= 4 pro cement třídy N,

= 6 pro cement třídy R,

α_{ds2} je součinitel závislý na třídě cementu:

= 0.13 pro cement třídy S,

= 0.12 pro cement třídy N,

= 0.11 pro cement třídy R,

β_{RH} zohledňuje vliv aktuální vlhkosti vzduchu okolního prostředí,

RH je relativní vlhkost okolního prostředí [%],

$RH_0 = 100$ %.

Poměrné autogenní smršťování v čase je dáno vztahem:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (2.7)$$

kde $\beta_{as}(t)$ je funkce popisující vývoj autogenního smršťování v čase a $\varepsilon_{ca}(\infty)$ je hodnota autogenního smrštění v čase ∞ .

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t^{0,5}), \quad (2.8)$$

kde t je dáno ve dnech,

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}. \quad (2.9)$$

Model ČSN EN 1992-1-1 tedy reflektuje tvar průřezu, dobu ošetřování betonu, jeho pevnost v tlaku, druh použitého cementu i vlhkost okolního prostředí. Nezohledňuje však vliv přísad a příměsí, a nenabízí zpřesnění na základě experimentálního měření.

2.2 Model B4

Model B4 staví na modelu B3 (Bažant – Baweja, 1995), který byl doporučením RILEM od roku 1996. Vylepšený model dle autorů umožňuje přesněji predikovat smrštění pro delší časová období, lépe rozlišovat mezi autogenním smrštěním a smrštěním vysycháním a zavádět nové rovnice a parametry pro zohlednění účinků různých příměsí a typů kameniva.

V první řadě je nutné poznamenat, že označení některých níže uvedených veličin nekoresponduje s označením původním (Bažant et al., 2015). K této úpravě autor přistoupil, aby byl text přehlednější a nedocházelo ke kolizi se značením u modelu ČSN EN 1992-1-1.

Celkové smrštění betonového prvku je i u tohoto modelu dáno jako součet smrštění vysycháním a autogenního smrštění, viz rovnice 2.1.

Smršťování vysycháním můžeme spočítat vztahem:

$$\varepsilon_{cd}(t) = -\varepsilon_{cd,0} \cdot k_{\varepsilon a} \cdot \frac{E_{cm}(t = 607)}{E_{cm}(t_0 + \tau_{sh})} \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_{ds}(t, t_0), \quad (2.10)$$

kde součinitel $k_{\varepsilon a}$ zohledňuje typ použitého kameniva (tab. 2.4), $E_{cm}(t)$ je sečnový modul pružnosti v čase t a τ_{sh} značí poločas smršťování vysycháním ve dnech.

$$\varepsilon_{cd,0} = \varepsilon_{cem} \cdot \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{\varepsilon a}} \cdot \left(\frac{w/c}{0.38}\right)^{p_{\varepsilon w}} \cdot \left(\frac{6.5c}{\rho}\right)^{p_{\varepsilon c}}, \quad (2.11)$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} 1 - RH^3 & \text{pro } RH \leq 98\%, \\ 12.94 \cdot (1 - RH) - 0.2 & \text{pro } 98\% \leq RH \leq 100\%, \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\beta_{ds}(t, t_0) = \tanh \sqrt{\frac{t}{\tau_{sh}}}, \quad (2.13)$$

$$\tau_{sh} = \tau_0 \cdot k_{\tau a} \cdot \left(k_s \cdot \frac{D}{1 \text{ mm}} \right)^2, \quad (2.14)$$

$$\tau_0 = \tau_{cem} \cdot \left(\frac{a/c}{6} \right)^{p_{\tau a}} \cdot \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{p_{\tau w}} \cdot \left(\frac{6.5c}{\rho} \right)^{p_{\tau c}}, \quad (2.15)$$

$$D = 2 V/S, \quad (2.16)$$

kde D je efektivní tloušťka, V/S poměr objemu prvku a plochy vysychajícího povrchu, a/c je hmotnostní poměr kameniva k cementu, w/c vodní součinitel, c je množství cementu, ρ je objemová hmotnost betonu, $k_{\tau a}$ součinitel podle typu použitého kameniva (tab. 2.4) a k_s je parametr zohledňující geometrii prvku:

$$k_s = \begin{cases} 1.00 & \text{pro nekonečnou desku,} \\ 1.15 & \text{pro nekonečný válece,} \\ 1.25 & \text{pro nekonečný trámec,} \\ 1.30 & \text{pro kouli,} \\ 1.55 & \text{pro krychli.} \end{cases} \quad (2.17)$$

Pro zjednodušenou analýzu lze předpokládat $k_s \approx 1$ (Bažant – Baweja, 1995). Parametry ε_{cem} , $p_{\varepsilon a}$, $p_{\varepsilon w}$, $p_{\varepsilon c}$, τ_{cem} , $p_{\tau a}$, $p_{\tau w}$ a $p_{\tau c}$ zohledňují třídu použitého cementu dle tab. 2.3:

Parametr	N	R	S
τ_{cem}	0.016	0.080	0.010
$p_{\tau a}$	-0.33	-0.33	-0.33
$p_{\tau w}$	-0.06	-2.40	3.55
$p_{\tau c}$	-0.10	-2.70	3.80
ε_{cem}	$360 \cdot 10^{-6}$	$860 \cdot 10^{-6}$	$410 \cdot 10^{-6}$
$p_{\varepsilon a}$	-0.80	-0.80	-0.80
$p_{\varepsilon w}$	1.10	-0.27	1.00
$p_{\varepsilon c}$	0.11	0.11	0.11

Tab. 2.3 Parametry pro smršťování vysycháním dle třídy cementu pro model B4 (Bažant et al., 2015)

Kamenivo	$k_{\tau a}$	$k_{\varepsilon a}$
Diabas	0.06	0.76
Křemen	0.59	0.71
Vápenec	1.80	0.95
Pískovec	2.30	1.60
Žula	4.00	1.05
Křemenný diorit	15.0	2.20

Tab. 2.4 Součinitele podle typu kameniva pro model B4 (Bažant et al., 2015)

Autogenní smrštění je dáno vzorcí:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \varepsilon_{ca}(\infty) \cdot \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{t} \right)^\alpha \right]^{r_t}, \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = -\varepsilon_{au, \text{cem}} \cdot \left(\frac{a/c}{6} \right)^{r_{\varepsilon a}} \cdot \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{r_{\varepsilon w}}, \quad (2.19)$$

$$\tau_{au} = \tau_{au, \text{cem}} \cdot \left(\frac{w/c}{0.38} \right)^{r_{\tau w}}, \quad (2.20)$$

$$\alpha = r_\alpha \cdot \left(\frac{w/c}{0.38} \right), \quad (2.21)$$

kde τ_{au} je poločas autogenního smršťování ve dnech a parametry r_t , $\varepsilon_{au, \text{cem}}$, $r_{\varepsilon a}$, $r_{\varepsilon w}$, $\tau_{au, \text{cem}}$, $r_{\tau w}$ a r_α zohledňují třídu použitého cementu dle tab. 2.5:

Parametr	N	R	S
$\tau_{au, \text{cem}}$	1.00	41.0	1.00
$r_{\tau w}$	3.00	3.00	3.00
r_t	-4.50	-4.50	-4.50
r_α	1.00	1.40	1.00
$\varepsilon_{au, \text{cem}}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$-84 \cdot 10^{-6}$	$0.00 \cdot 10^{-6}$
$r_{\varepsilon a}$	-0.75	-0.75	-0.75
$r_{\varepsilon w}$	-3.50	-3.50	-3.50

Tab. 2.5 Parametry pro autogenní smršťování dle třídy cementu pro model B4 (Bažant et al., 2015)

Model B4 umožňuje pro zpřesnění predikce smrštění zahrnout do výpočtu vliv příměsí a přísad vyjádřený součiniteli uvedenými v tab. 2.6. Komplikací může být vliv interagujících chemických reakcí na změnu objemu při použití více přísad.

Přísada (% hmotnosti cementu)	$\cdot\tau_{\text{cem}}$	$\cdot\varepsilon_{\text{au,cem}}$	$\cdot r_{\varepsilon\text{W}}$	$\cdot r_{\alpha}$
Re (≤ 0.5), Fly (≤ 15)	6.00	0.58	0.50	2.60
Re ($> 0.5, \leq 0.6$), Fly (≤ 15)	2.00	0.43	0.59	3.10
Re ($> 0.5, \leq 0.6$), Fly ($> 15, \leq 30$)	2.10	0.72	0.88	3.40
Re ($> 0.5, \leq 0.6$), Fly (> 30)	2.80	0.87	1.60	5.00
Re (> 0.6), Fly (≤ 15)	2.00	0.26	0.22	0.95
Re (> 0.6), Fly ($> 15, \leq 30$)	2.10	1.10	1.10	3.30
Re (> 0.6), Fly (> 30)	2.10	1.10	0.97	4.00
Fly (≤ 15), Super (≤ 5)	0.32	0.71	0.55	1.71
Fly (≤ 15), Super (> 5)	0.32	0.55	0.92	2.30
Fly ($> 15, \leq 30$), Super (≤ 5)	0.50	0.90	0.82	1.25
Fly ($> 15, \leq 30$), Super (> 5)	0.50	0.80	0.80	2.81
Fly (> 30), Super (≤ 5)	0.63	1.38	0.00	1.20
Fly (> 30), Super (> 5)	0.63	0.95	0.76	3.11
Super (≤ 5), Silica (≤ 8)	6.00	2.80	0.29	0.21
Super (≤ 5), Silica (> 8)	3.00	0.96	0.26	0.71
Super (> 5), Silica (≤ 8)	8.00	1.95	0.00	1.00
Silica (≤ 8)	1.90	0.47	0.00	1.20
Silica ($> 8, \leq 18$)	2.60	0.82	0.00	1.20
Silica (> 18)	1.00	1.50	5.00	1.00
AEA (≤ 0.05)	2.30	1.10	0.28	0.35
AEA (> 0.05)	0.44	4.28	0.00	0.36
WR (≤ 2)	0.50	0.38	0.00	1.90
WR ($> 2, \leq 3$)	6.00	0.45	1.51	0.30
WR (> 3)	2.40	0.40	0.68	1.40

Tab. 2.6 Vliv přísad na průběh smršťování pro model B4 (Re = retardační přísada, Fly = popílek, Super = superplastifikátor, Silica = křemičitý úlet, AEA = provzdušňovací přísada, WR = plastifikátor) (Bažant et al., 2015)

Nejlépeším způsobem, jak snížit nejistotu predikce, je zpřesnit model na základě extrapolace krátkodobých zkoušek konkrétního betonu. Aktualizace je účinná již při délce měření 1 měsíc (Bažant et al., 2015). U smršťování je však zpřesnění složitější, protože z krátkodobého sledování nelze určit finální hodnotu smrštění, a tedy ani poločas smršťování. Nejistota při extrapolaci smršťování vysycháním může být výrazně snížena, pokud se současně se smrštěním sleduje i průběh hmotnostního úbytku, protože smršťování a hmotnostní úbytek jsou na sobě vzájemně závislé. Poločas smršťování a poločas hmotnostních úbytků jsou zhruba stejné (Bažant et al., 2015). Poločas hmotnostního úbytku lze i při krátkodobém měření vypočítat sta-

novením konečného hmotnostního úbytku na vysušeném vzorku, a díky tomu lze určit i poločas smršťování. Uvedená metoda zpřesnění predikce byla popsána již u původního modelu B3 (Bažant – Baweja, 1995).

Model B4 stejně jako model ČSN EN 1992-1-1 zohledňuje tvar smršťujícího průřezu, dobu ošetřování betonu, druh cementu a vliv relativní vlhkosti okolí. Navíc reflektuje množství základních komponent betonu, typ použitého kameniva a množství užitých speciálních přísad a příměsí. Když přihlédneme i k možnosti zpřesnění modelu, je zřejmé, že model B4 je mnohem komplexnější než model použitý v normě.

3 LABORATORNÍ ZKOUŠKY

Experimenty vyhodnocené v této práci probíhaly na Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně pod vedením Ing. Barbary Kucharczykové, Ph.D.

3.1 Použitý materiál

Zkušební vzorky použité v experimentu byly vyrobeny ze dvou různých jemnozrných směsí na bázi cementu. Směsi budou dále oznčovány A a C. Složení zkoušených kompozitů se lišilo pouze v hodnotě vodního součinitele a množství superplastifikátoru, zbytek složení byl vždy stejný. Čerstvé směsi byly vyrobeny za použití standardizovaného křemičitého písku s maximální nominální velikostí zrna 2 mm, Portlandského cementu CEM I 42,5 R a vody. Poměry jednotlivých složek jsou spolu s rozměry těles uvedeny v tab. 3.1. Směs C obsahuje také polykarboxylátový superplastifikátor založený na bázi etheru (SP) SIKa SVC 4035 v množství 1 % hmotnosti cementu. Pro přípravu čerstvých směsí bylo použito míchací zařízení s řízenou rychlostí míchání.

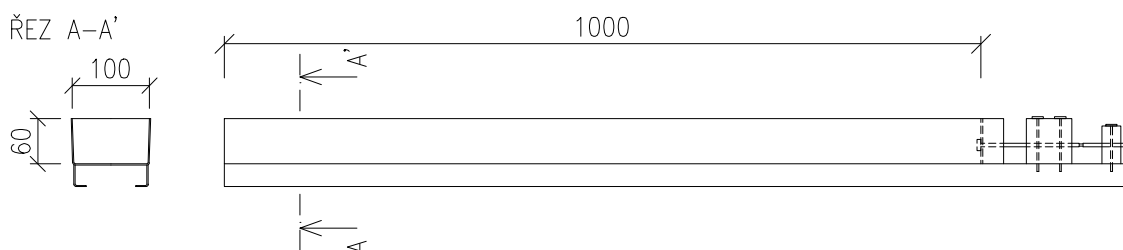
Směs	A	C
Hm. poměr kamenivo : cement : voda	3 : 1 : 0.5	3 : 1 : 0.35
Použitý cement	CEM I 42.5 R	
Množství cementu c [kg/m ³]	489	524
Pří sada	—	SP
Množství přísady (% hmotnosti cementu)	—	1
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2200	2280
Rozměry těles [mm]	1000 · 100 · 60	

Tab. 3.1 Složení směsí a rozměry těles

3.2 Měřicí zařízení

Speciální formy o délce 1000 mm byly umístěné na stole, který umožňoval simultánní měření délkových změn, průběhu vnitřní teploty a hmotnostních úbytků zkoumaných kompozitů. Změny délky byly měřeny ve směru podélné osy vzorků umístěných ve formách vybavených jedním pevným a jedním pohyblivým čelem. Měřicí základna byla dána kotvami připevněnými na obě čela. Tření na rozhraní měřeného materiálu a stěn formy bylo zabráněno vložením polyetylenové pěnové rohože (MIRELON)

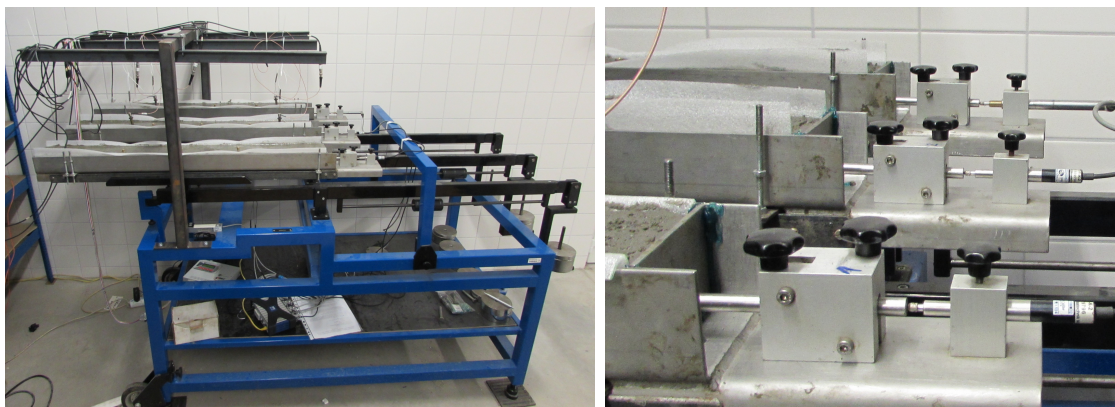
o tloušťce 2 mm do forem před tím, než byly naplněny kompozity, což umožnilo volnou deformaci. Délkové deformace byly měřeny standardními indukčními senzory WA2T s měřicím rozpětím 2 mm a přesností 0,001 mm. Senzory na straně pohyblivého čela formy byly pevně zafixovány k formě.



Obr. 3.1 Schéma měřicího žlabu

Pro zajištění kontinuálního měření hmotnostních ztrát způsobených odpařováním vody z horního povrchu vzorků byly naplněné formy uloženy na speciální vážicí stůl. Pevný rám byl osazen vysoce citlivými jednobodovými zatěžovacími buňkami s maximální nosností 3 kg.

Změny délky a hmotnosti byly automaticky zaznamenávány a uloženy pomocí univerzálního zesilovače Quantum X/MX s 8 individuálně konfigurovatelnými vstupy. Nastavení měřicích přístrojů před zahájením měření bylo provedeno pomocí počítačového softwaru CatmenEasy.



Obr. 3.2 Uspořádání měřicích zařízení během experimentu (zleva: naplněné formy na vážicím stole; detail indukčního senzoru opřené o pohyblivé čelo formy)

Pro zaznamenání vývoje teploty uvnitř vzorků byly umístěny přibližně 200 mm od konce forem platinové teplotní senzory COMET PT 1000. Senzory byly umístěny do středu příčného řezu zkušebních těles. Naměřená data byla zaznamenávána s periodou 5 minut pomocí teploměru se záznamem. Teplota a relativní vlhkost okolního prostředí byly nepřetržitě zaznamenávány každých 15 minut automatickou měřicí stanicí COMET.

Měření změn délky bylo zahájeno 1,5 hodiny (směs A) a 1 hodinu (směs C) po smíchání směsi. Zkouška probíhala v klimatické komoře při teplotě $21 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $60 \pm 10\%$ po dobu přibližně 70 hodin. Horní povrch vzorků záměrně nebyl chráněn před vysycháním. Během experimentů byla zkušební místnost zamčená, měření tak proběhlo nerušeně.

Po cca 70 hodinách ve formách byly betonové trámce odformovány a uschovány v policích. Plocha vystavená vysychání se zvětšila o svislé stěny prvku. I zde byly po dobu přibližně 100 dnů zaznamenávány změny délky a hmotnosti trámců.

4 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Každý měřený parametr byl zaznamenáván konkrétním senzorem. Lišily se jednotlivé frekvence zápisu těchto snímačů stejně jako časy počátku měření. Pro potřeby zpracování experimentálně získaných hodnot bylo potřeba výstupní data upravit s předpokladem co nejvěrnějšího zachování průběhu naměřených posloupností.

4.1 Software

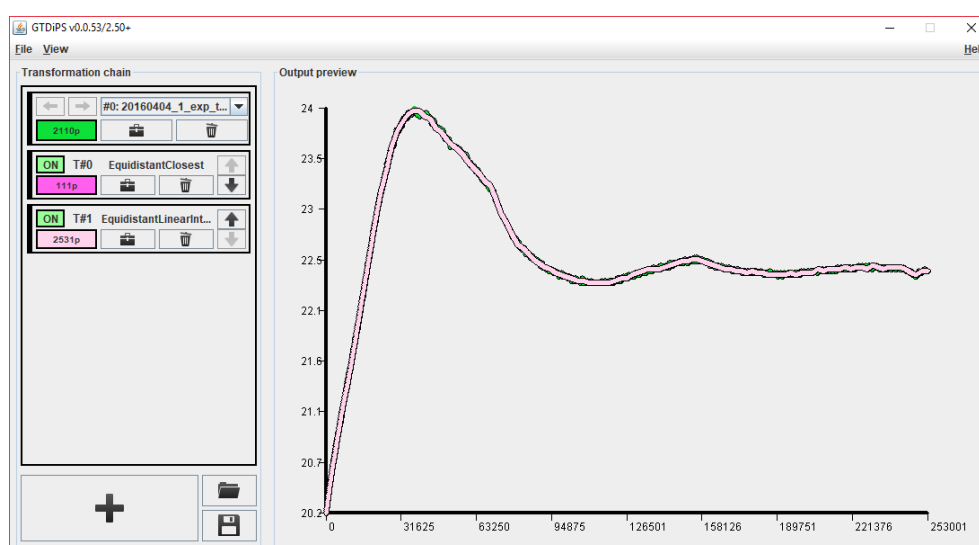
4.1.1 MS Excel

Pro většinu operací včetně tvorby a exportu grafů byly využity funkce programu MS Excel a autorem vytvořená makra.

4.1.2 GTDiPS

Mimo MS Excel byl k úpravě výstupních dat použit program GTDiPS (General Transformation of Discrete Point Sequence). Tento software umožňuje zpracování i velmi rozsáhlých bodových posloupností a obsahuje desítky jednoduchých i pokročilých transformačních metod. Program pracuje s textovými soubory, které pro vložení musejí obsahovat pevně danou strukturu.

Autory aplikace jsou doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D. a Ing. Jan Mašek. Oba jsou zaměstnanci Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Při zpracování dat byl použit návod pro práci s programem vytvořený výše uvedenými autory – Aplikace GTDiPS (Frantík – Mašek, 2014).



Obr. 4.1 GTDiPS – pracovní okno

Program GTDiPS byl využit pro převzorkování posloupností bodů získaných ze zkoušek. Nejprve se ručně nastavil shodný počáteční a koncový čas pro všechna měření. U záznamů změn vnitřní teploty, které odstartovaly dříve než měření protažení, byl počáteční bod měření zadán pomocí lineární interpolace nejbližších časů a jim odpovídajících teplot. Obdobně byl nastaven i poslední bod posloupností.

Takto připravené záznamy byly nahrány do programu GTDiPS. V optimálním případě hladkého průběhu posloupnosti byla užita transformace *Equidistant Linear Interpolation*, která vytvoří zadaný počet n bodů se vzorkovací frekvencí $T/(n-1)$, kde T je doba trvání měření. Pokud získané posloupnosti vykazovaly skokový průběh způsobený citlivostí senzoru (především u záznamu vnitřní teploty), bylo nutné nejdříve takový průběh vyhladit. Po úpravě byla data exportována ke zpracování v MS Excel.

Aplikace GTDiPS byla použita i pro získání funkce součinitele teplotní roztažnosti, viz kapitolu 4.2.

4.2 Výpočet vybraných parametrů

Relativní délkové změny byly počítány z experimentálně získaných dat podle následujícího vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (4.1)$$

kde ε je relativní protažení [$\mu\varepsilon$], Δl je měřená změna délky [mm] a l_0 délka měřicí základny [mm].

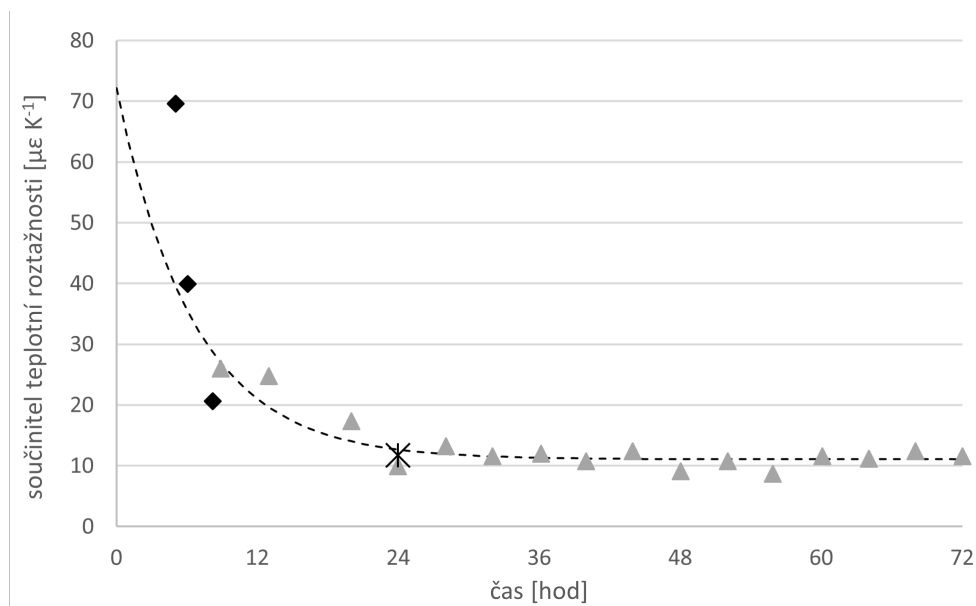
Obdobně byly vyčísleny relativní hmotnostní změny dle vzorce 4.2:

$$\Delta m = \frac{\Delta m_i}{m_0} \cdot 100, \quad (4.2)$$

ve kterém Δm je hledaná hmotnostní ztráta [%], Δm_i značí průběžně měřený úbytek hmotnosti [g] a m_0 představuje počáteční hmotnost čerstvého kompozitu umístěného ve formě před začátkem měření [g].

Pro výpočet odhadu změny délky vzorků vlivem oteplení bylo nutné stanovit funkci součinitele teplotní roztažnosti. Z hodnot odečtených z obr. 1.5 doc. Ing. Petrem Frantíkem, Ph.D. byla s použitím aproximační transformace *GA Exponential Tail* programu GTDiPS stanovena následovně (čas je zde dosazován v hodinách):

$$\alpha_T(t) = 61,04444 \cdot \exp(-0,15138 \cdot t) + 11,06159. \quad (4.3)$$



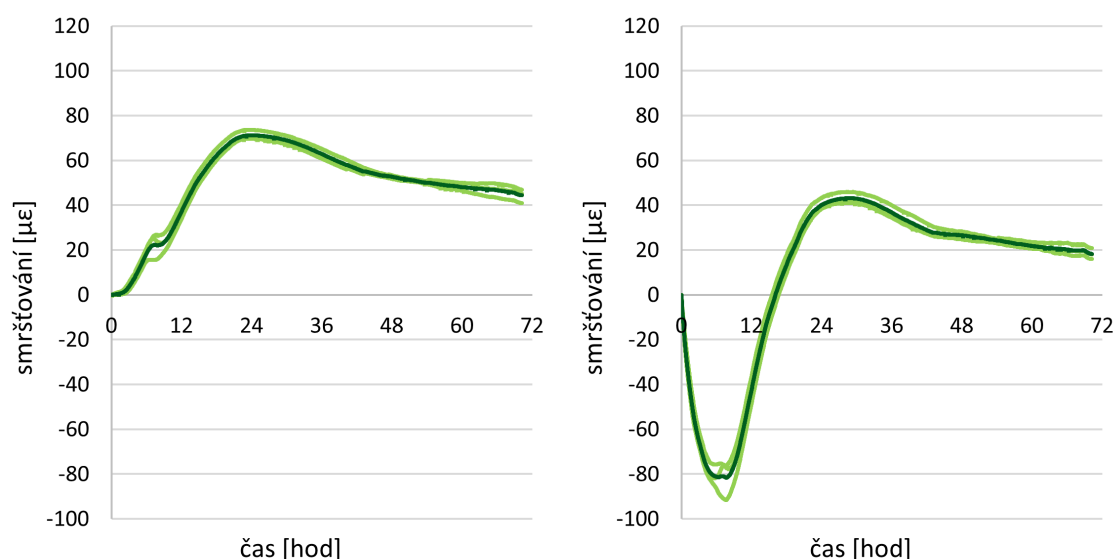
Obr. 4.2 Funkce součinitele teplotní roztažnosti $\alpha_T(t)$

Uvedený vztah byl použit pro vyčíslení odhadu prodloužení těles vlivem teploty. Takto spočítaný průběh změn délky vlivem teploty byl následně odečten od hodnot získaných experimentem na čele žlabu.

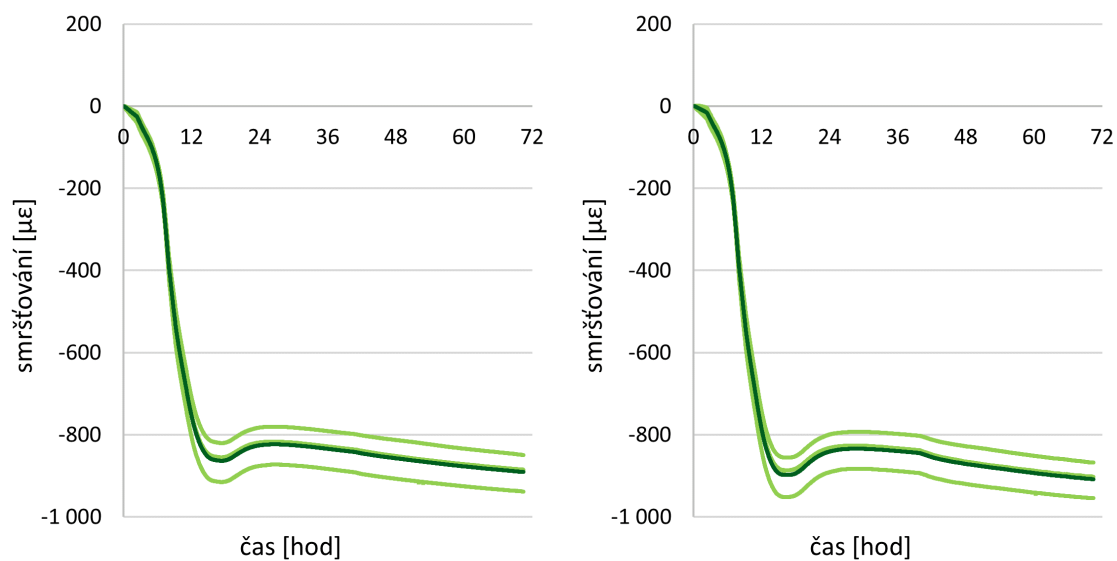
5 VÝSLEDKY

Před samotným vyhodnocením naměřených a vypočítaných parametrů bylo potřeba stanovit průběh hodnot smrštění pro zkoušená tělesa z jednotlivých směsí. Tento charakteristický průběh byl stanoven jako aritmetický průměr hodnot příslušných parametrů. Grafy jednotlivých vzorků obou směsí lze vidět v příloze A a B. Na obrázcích níže jsou vidět průběhy všech vzorků každé směsi společně s barevně odlišeným vypočítaným průměrem.

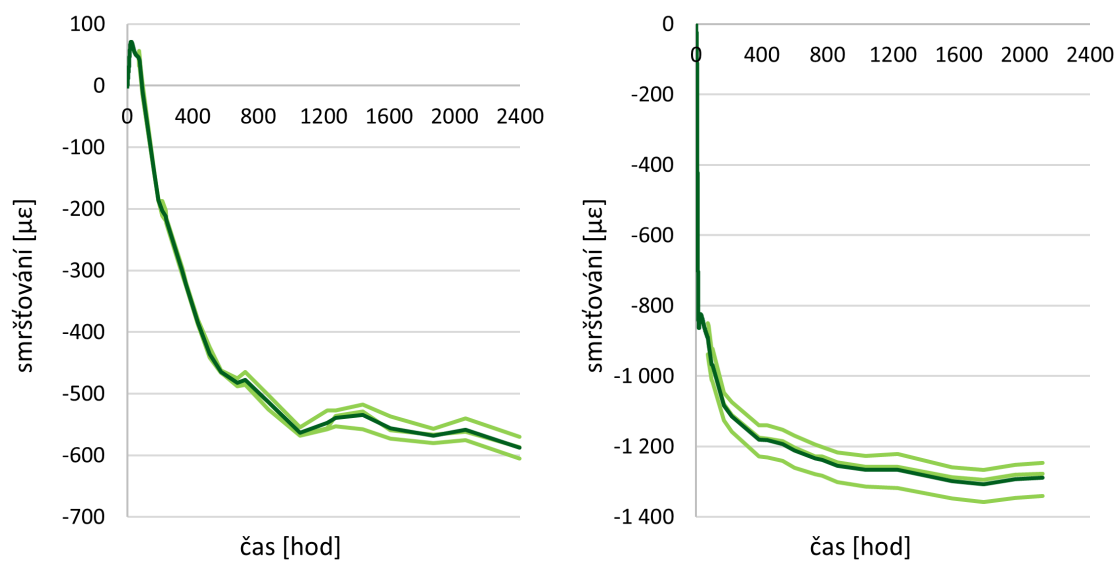
Charakteristický průběh smrštění byl stanoven pro naměřená posunutí na pohyblivém čele a pro stanovená teoretická smrštění. Vypočítaný teoretický průběh smrštění zobrazuje vývoj smrštění těles po odečtení vlivu teplotní roztažnosti.



Obr. 5.1 Tělesa A ve žlabu (zleva: naměřená posunutí čela a jejich průměrná hodnota; vypočítaná teoretická smrštění a jejich průměrná hodnota)



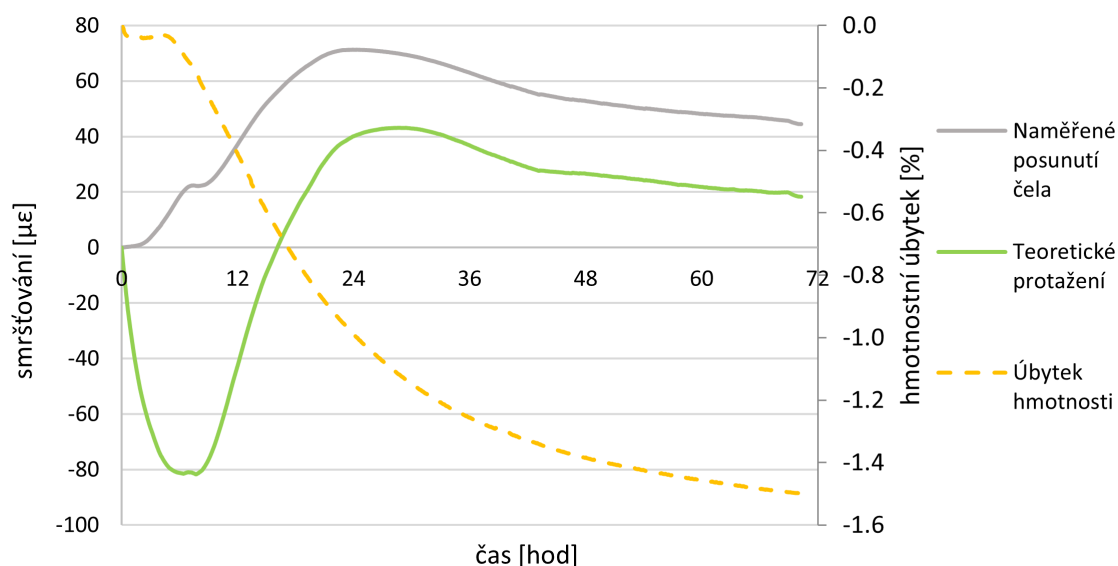
Obr. 5.2 Tělesa C ve žlabu (zleva: naměřená posunutí čela a jejich průměrná hodnota; vypočítaná teoretická smrštění a jejich průměrná hodnota)



Obr. 5.3 Tělesa po odformování – naměřená posunutí čela a jejich průměrná hodnota (zleva: tělesa A; tělesa C)

Výsledkem práce jsou upravené diagramy průběhu naměřených a vypočítaných parametrů jednotlivých směsí A a C. Nejvíce pozornosti si zaslouží hledané teoretické protažení, které představuje kýžený ideální vývoj smrštění po odečtení vlivu teplotní dilatace.

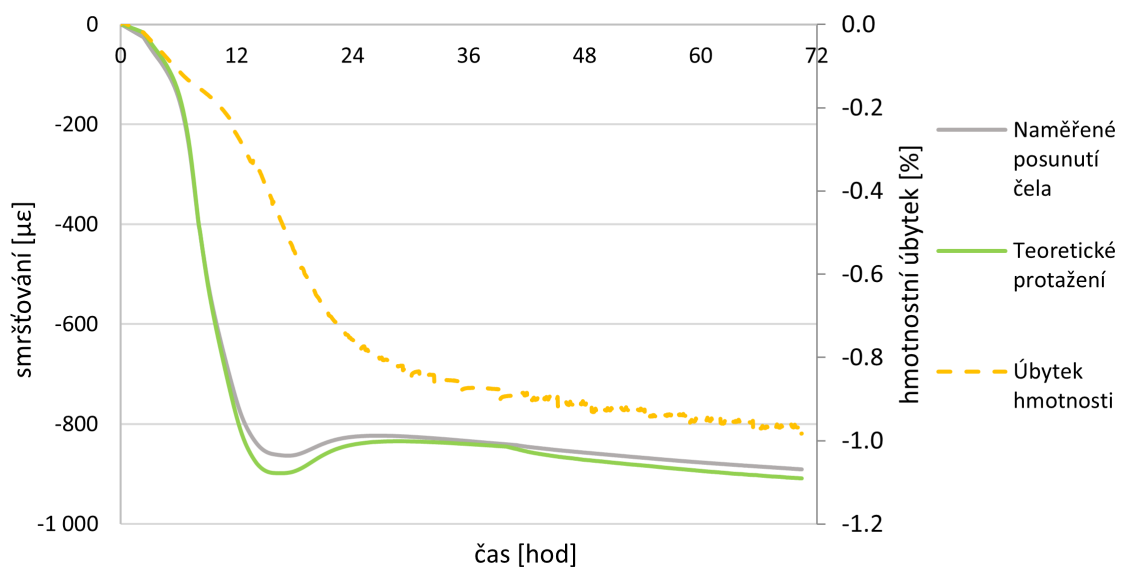
První sada grafů zobrazuje porovnání průběhu naměřeného posunutí čela, vypočítaného teoretického smrštění bez vlivu teplotní dilatace a hmotnostního úbytku.



Obr. 5.4 Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti ve žlabu

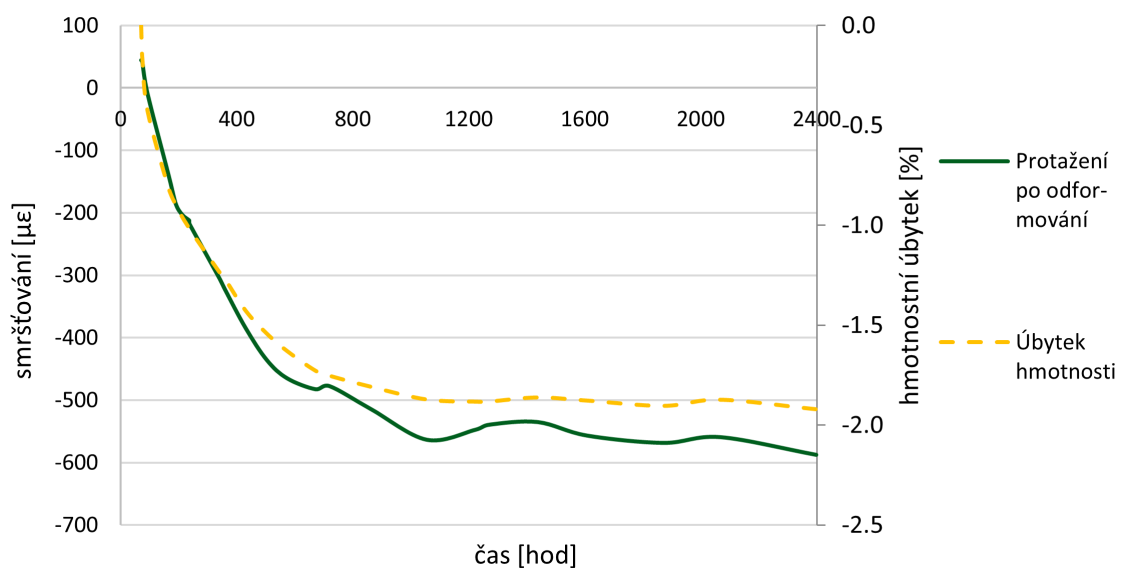
U těles ze směsi A lze přes ztrátu hmotnosti vysycháním pozorovat protažení trámce v prvních 24 hodinách. Tento přírůstek je plně přičítán nárůstu vnitřní teploty a teplotní dilataci, jelikož po odečtení jejich vlivu se během prvních 6 hodin projeví autogenní smrštění.

V případě směsi C obsahující superplastifikátor byl pozorován prudký nárůst kontrakce zkušebních vzorků ihned po zahájení měření. Tato rychlá kontrakce se zastavila po přibližně 15 hodinách a dosáhla téměř hodnoty smrštění na konci měření ve formách. Vliv teplotní roztažnosti byl u těchto těles minimální – do 5 % z naměřených hodnot.

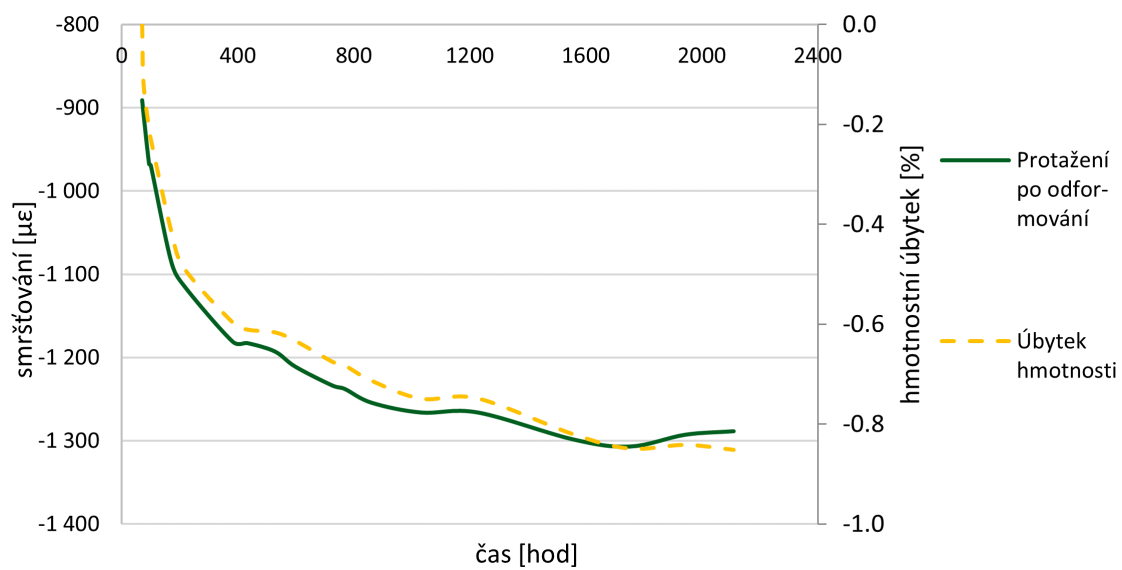


Obr. 5.5 Směs C: průběh smrštění a úbytku hmotnosti ve žlabu

Na diagramech znázorňujících měření smršťování po odformování je vidět, že křivka úbytku hmotnosti odpovídá vývoji smrštění. Z toho lze usuzovat, že hlavní podíl na naměřených hodnotách mělo smrštění od vysychání.



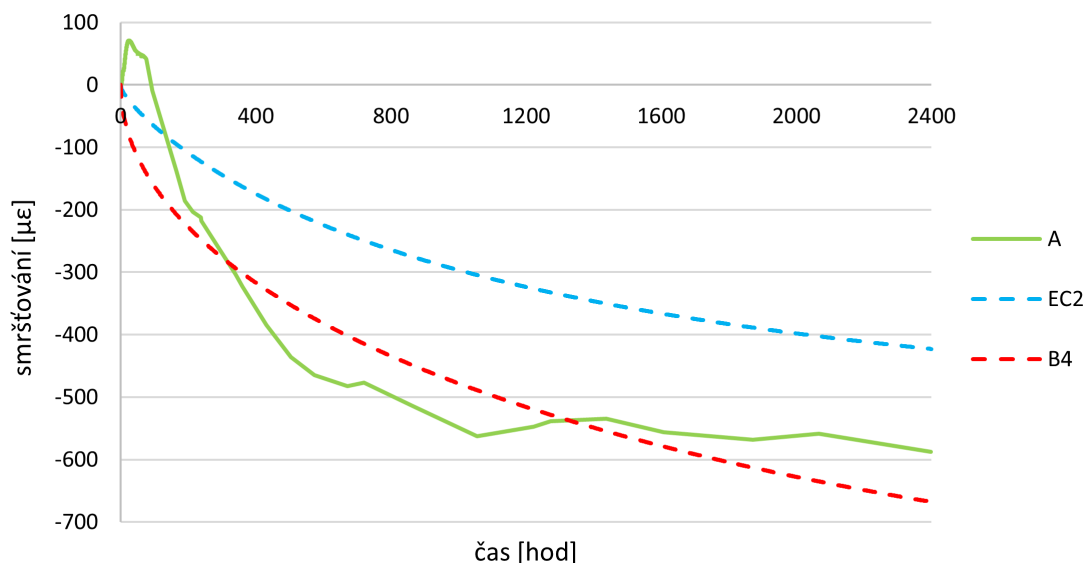
Obr. 5.6 Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti po odformování



Obr. 5.7 Směs A: průběh smrštění a úbytku hmotnosti po odformování

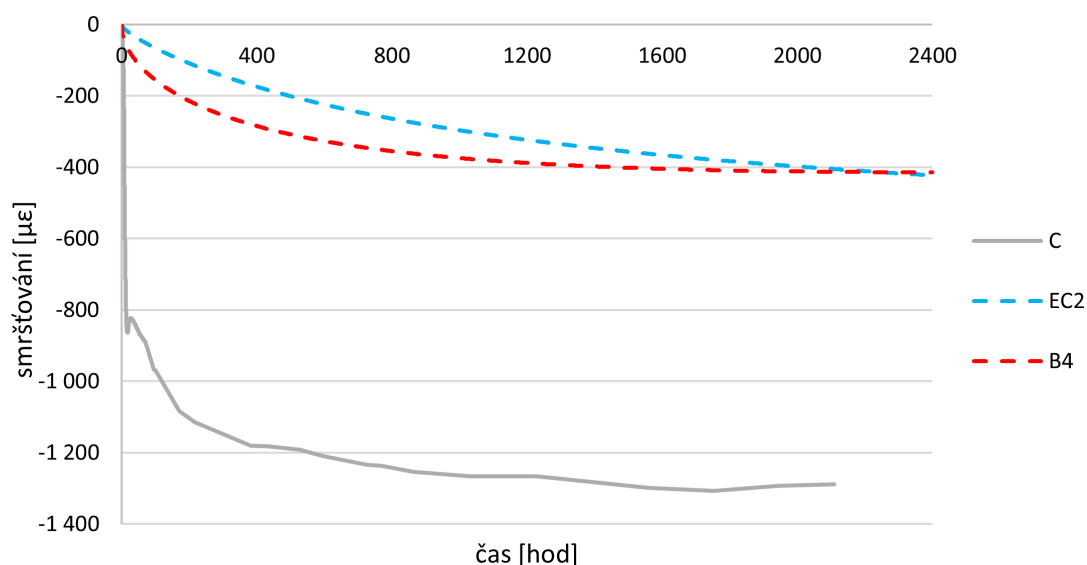
Druhá sada diagramů představuje srovnání naměřeného průběhu smršťování na trácích s hodnotami dle ČSN EN 1992-1-1 a Modelu B4.

Ze vstupních údajů je zřejmé, že Eurokód predikuje pro obě testované směsi jednotný průběh smrštění v čase. Přidání superplastifikační přísady má zásadní vliv na vývoj smršťování, ale není Eurokódem zohledněno. Model B4 umožňuje upravit predikci smršťování na míru podle dané směsi pomocí tzv. opravných součinitelů, které závisejí na typu a množství přísad.



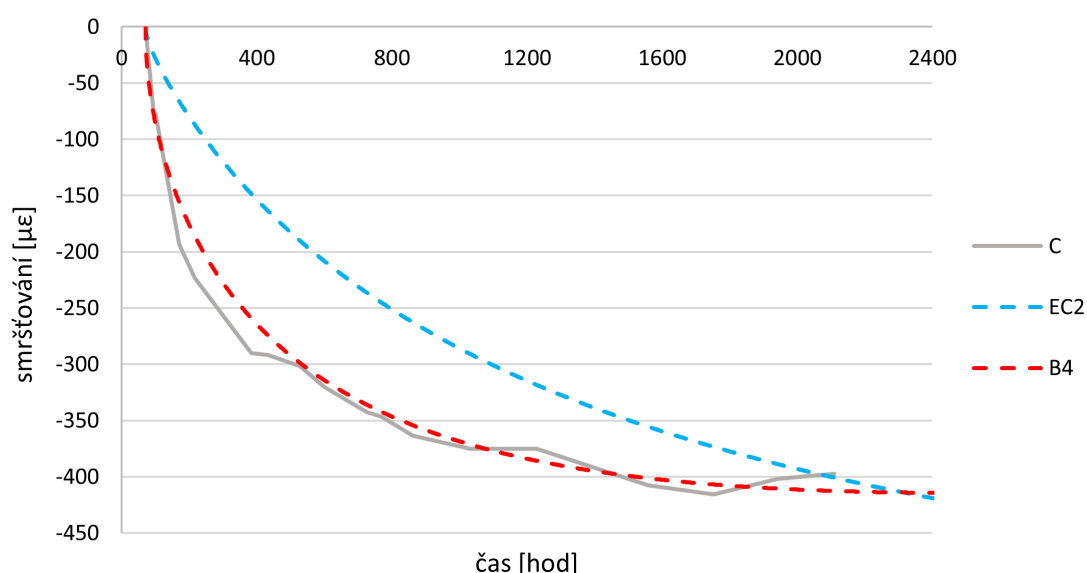
Obr. 5.8 Směs A: srovnání celkového naměřeného smrštění s hodnotami numerických modelů

U směsi A predikce modelu B4 sleduje dlouhodobý trend vývoje naměřeného smršťování v několikaměsíčním časovém horizontu lépe než model normový. Nabývání betonu model B4 zachytit dokáže také, ale nepodařilo se najít takovou kombinaci opravných součinitelů, která by námi naměřenou expanzi v prvních několika dnech zachytila.



Obr. 5.9 Směs C: srovnání celkového naměřeného smrštění s hodnotami numerických modelů

U vzorku C nebylo dosaženo shody ani v jednom případě. Příčinou byla prudká kontrakce způsobená použitím superplastifikátoru ještě v době zrání ve formách. Ani užití opravných součinitelů pro superplastifikátor modelu B4 z tab. 2.6 k zachycení tohoto trendu nepomohlo. Důvodem může být uvedení použití superplastifikační přísady ve zmíněné tabulce pouze v kombinaci s dalšími přísadami. V dalším kroku byly predikční modely aplikovány pouze na průběh smrštění po odformování.



Obr. 5.10 Směs C: srovnání naměřeného smrštění po odformování s hodnotami numerických modelů

S tímto přístupem lze vidět markantní zlepšení předpovědi vývoje smršťování. Ani v tomto případě však žádná z kombinací nabízených součinitelů v Bažant et al. (2015) nevedla k optimálnímu výsledku. Pro predikci modelu B4 byly nalezeny hodnoty opravých součinitelů, které chování testované směsi C vystihují:

Přísada (% hmotnosti cementu)	$\cdot\tau_{\text{cem}}$	$\cdot\varepsilon_{\text{au,cem}}$	$\cdot\tau_{\varepsilon\text{w}}$	$\cdot r_{\alpha}$
SP SIKA SVC 4035 (1)	0.42	8.00	0.60	0.49

Tab. 5.1 Použité hodnoty opravých součinitelů pro model B4

Aplikací predikčního modelu na část diagramu po odformování se zlepšila i předpověď vývoje smršťování Eurokódem. Nevystihuje sice počáteční rychlost smrštění, ale hodnoty v době kolem tří měsíců jsou podobné.

6 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá úpravou a vyhodnocením objemových změn betonových trámů se zaměřením na smršťování a jeho příčiny. Data získaná z laboratorních zkoušek byla upravena v programech MS Excel a GTDiPS. Výsledkem těchto úprav jsou diagramy publikované v této práci.

První skupina výsledků je zaměřena na určení podílu tepelné dilatace a úbytku hmotnosti na velikosti smršťování v prvních třech dnech zrání betonu. U betonu bez přísad je podíl teplotní dilatace na smrštění mladého betonu velký a může způsobit krátkodobé zvětšení objemu. Při použití superplastifikační přísady je ovšem nástup smršťování výrazně rychlejší a podíl tepelné dilatace je nízký. Z výsledků dále vyplývá, že poměr maximálních hodnot hmotnostních úbytků odpovídá poměru vodních součinitelů jednotlivých směsí. Pro potvrzení tohoto trendu by však bylo potřeba provést více měření.

Dlouhodobým měřením bylo prokázáno, že největší podíl na objemových změnách mělo po odformování smršťování vysycháním. U obou sad vzorků je průběh hmotnostních úbytků téměř shodný s průběhem naměřeného smrštění. Tomuto faktu přispělo především zvětšení plochy vysychajícího povrchu trámů odformováním.

Druhá skupina výsledků zahrnuje srovnání naměřených hodnot smršťování s vybranými predikčními modely – ČSN EN 1992-1-1 a B4. U směsi A lze konstatovat, že model B4 vcelku přesně předpovídá průběh smršťování. Smršťování směsi C je významně ovlivněno použitím superplastifikátoru a rychlost smrštění v prvních 15 hodinách nelze predikčními modely vystihnout, ani s použitím opravných součinitelů. Pro zachycení vývoje smršťování u této směsi po odformování modelem B4 byly nalezeny opravné součinitele.

LITERATURA

- BAŽANT, Z. P. – BAWEJA, S. *Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – model B3*. RILEM: TC-107-GCS guidelines for the formulation of creep and shrinkage prediction models, Materials and structures, 1995.
- BAŽANT, Z. P. – HUBLER, M. H. – WENDNER, R. *Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability*. RILEM: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis, Materials and structures, 2015. DOI 10.1617/s11527-014-0485-2.
- COLLEPARDI, M. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. Edice: Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- FRANTÍK, P. – MAŠEK, J. *Aplikace GTDiPS*. Brno: VUT FAST, 2014.
- HOLT, E. E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001. ISBN 951-38-6250-X.
- NAVRÁTIL, J. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- ZVOLÁNEK, L. *Experimentální a numerická analýza reologických procesů v průběhu zrání betonu*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

obr. obrázek

tab. tabulka

tj. to je

tzv. takzvaný, takzvaně

A_c průřezová plocha betonu [m^2]

a/c hmotnostní poměr kameniva a cementu $[-]$

α_{ds1} součinitel závislý na třídě cementu $[-]$

α_{ds2} součinitel závislý na třídě cementu $[-]$

α_h stupeň hydratace cementu $[-]$

α_T součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]

$\alpha_T(t)$ funkce součinitele teplotní roztažnosti [K^{-1}]

$\beta_{\text{as}}(t)$ funkce průběhu autogenního smršťování v čase $[-]$

$\beta_{\text{ds}}(t, t_0)$ funkce průběhu smrštění od vysychání v čase $[-]$

β_{RH} součinitel vlivu aktuální vlhkosti okolního prostředí $[-]$

c množství cementu [kg/m^3]

CS chemické smrštění $[\varepsilon]$

D efektivní tloušťka průřezu [mm]

Δl prodloužení tělesa [m]

Δm hmotnostní ztráta $[\%]$

Δm_i průběžně měřený úbytek hmotnosti [g]

ΔT přírůstek teploty [K]

E_{cm} sečnový modul pružnosti betonu [GPa]

ε relativní protažení $[-]$

$\varepsilon_{\text{au, cem}}$ součinitel závislý na třídě cementu $[-]$

ε_{ca}	poměrné autogenní smršťování [–]
$\varepsilon_{ca}(t)$	poměrné autogenní smršťování v čase [–]
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	hodnota autogenního smrštění v čase ∞ [–]
ε_{cd}	poměrné smršťování vysycháním [–]
$\varepsilon_{cd}(t)$	poměrné smršťování vysycháním v čase [–]
$\varepsilon_{cd,0}$	základní (neomezené) poměrné smršťování vysycháním [–]
ε_{cem}	součinitel závislý na třídě cementu [–]
ε_{cs}	poměrné přetvoření od smršťování [–]
f_{ck}	charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku [MPa]
f_{cm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku [MPa]
f_{cmo}	10 MPa
h_0	náhradní rozměr průřezu [mm]
k_h	součinitel tvaru průřezu [–]
k_s	součinitel geometrie prvku [–]
$k_{\varepsilon a}$	součinitel typu kameniva [–]
$k_{\tau a}$	součinitel typu kameniva [–]
l_0	počáteční délka [m]
m_0	počáteční hmotnost čerstvého betonu [g]
pH	vodíkový exponent [–]
$p_{\varepsilon a}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]
$p_{\varepsilon c}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]
$p_{\varepsilon w}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]
$p_{\tau a}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]
$p_{\tau c}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]
$p_{\tau w}$	součinitel závislý na třídě cementu [–]

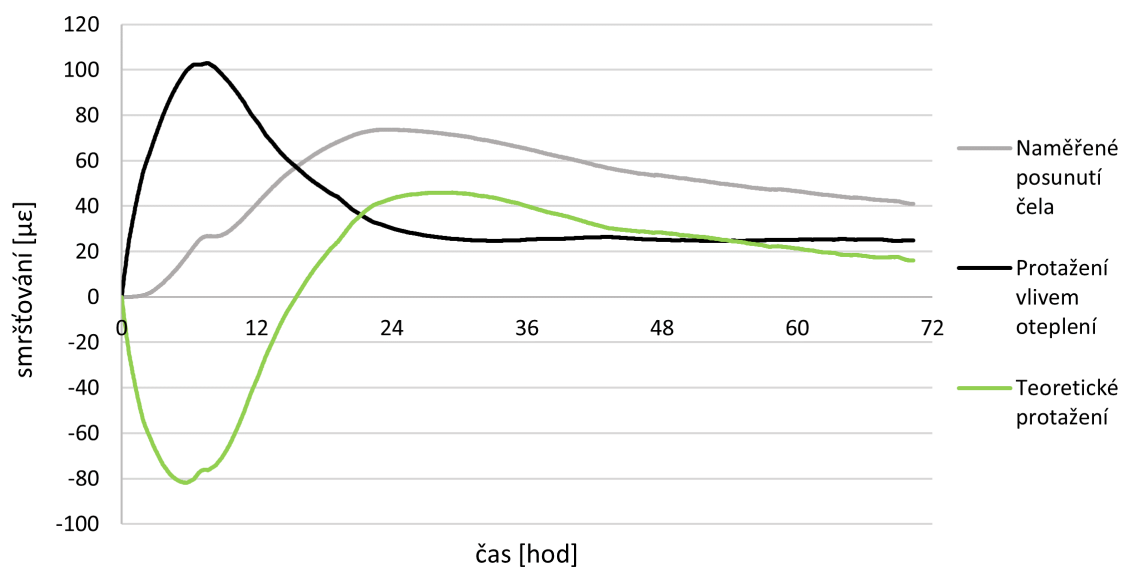
r_t	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
r_α	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
$r_{\varepsilon a}$	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
$r_{\varepsilon w}$	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
$r_{\tau w}$	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
RH	relativní vlhkost okolního prostředí $[\%]$
RH_0	100 $\%$
ρ	objemová hmotnost $[\text{kg}/\text{m}^3]$
t	stáří betonu $[\text{dny}]$
t_0	stáří betonu na začátku smršťování vysycháním $[\text{dny}]$
τ_{au}	poločas autogenního smršťování $[\text{dny}]$
$\tau_{\text{au, cem}}$	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
τ_{cem}	součinitel závislý na třídě cementu $[-]$
τ_{sh}	poločas smršťování vysycháním $[\text{dny}]$
u_0	obvod části průřezu vystavené vysychání $[\text{m}]$
V_C	objem hydratovaného cementu $[\text{m}^3]$
V_{Ci}	objem cementu před smícháním $[\text{m}^3]$
V_{hy}	objem hydratačních produktů $[\text{m}^3]$
V_p	kapilární pórovitost $[-]$
V_W	objem reakční vody $[\text{m}^3]$
V_{Wi}	objem vody před smícháním $[\text{m}^3]$
V/S	poměr objemu prvku a plochy vysychajícího povrchu $[\text{mm}]$
w/c	vodní součinitel $[-]$

SEZNAM PŘÍLOH

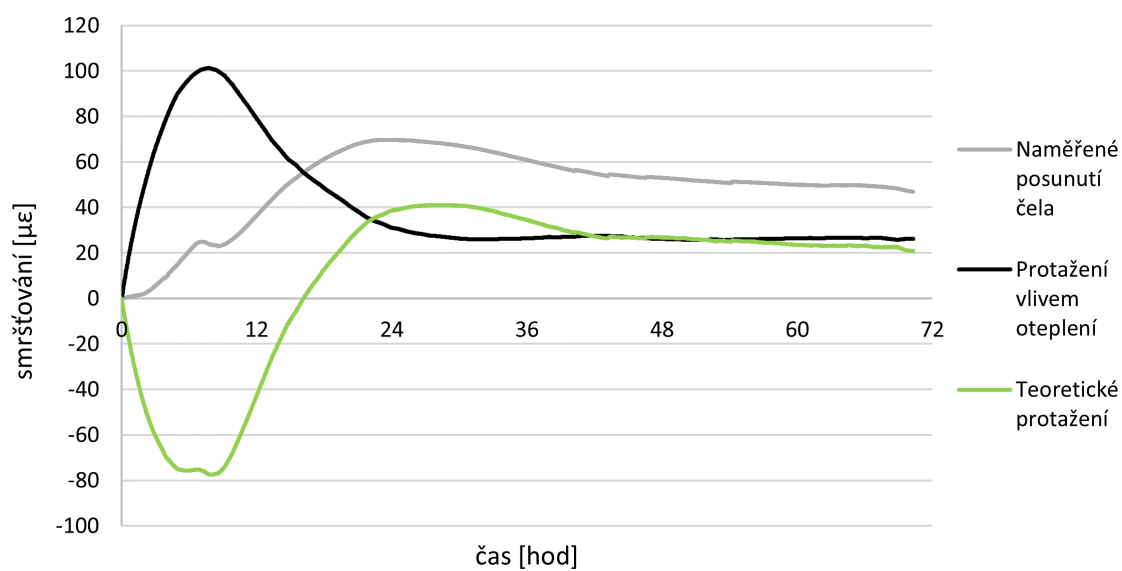
A	Protažení ve žlabech	50
A.1	Sada A	50
A.2	Sada C	52
B	Protažení po odformování	54
B.1	Sada A	54
B.2	Sada C	56

A PROTAŽENÍ VE ŽLABECH

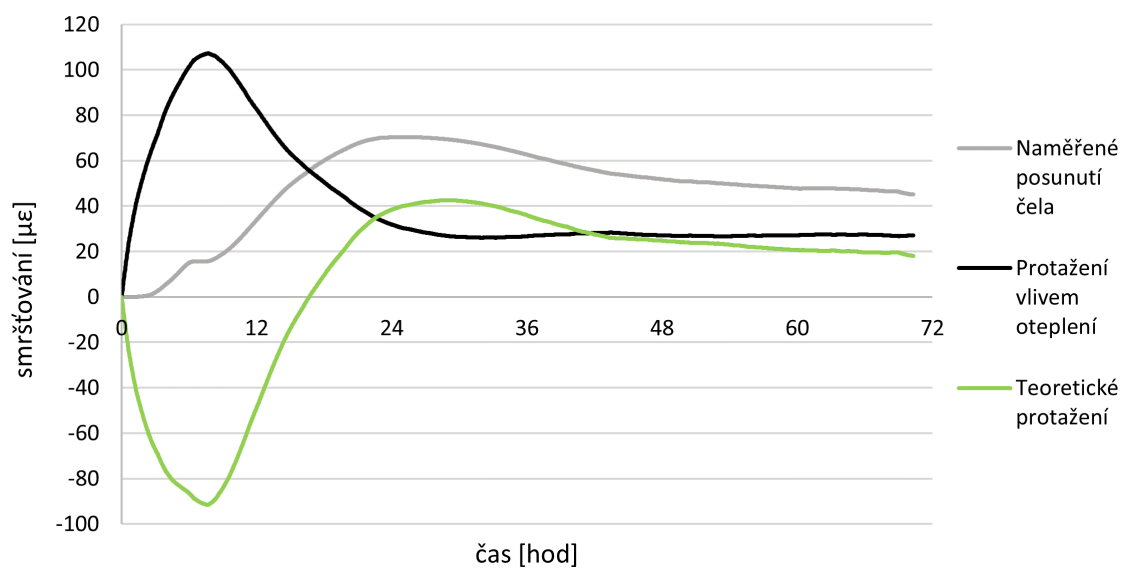
A.1 Sada A



Obr. A.1 Smršťování tělesa A1 ve žlabu

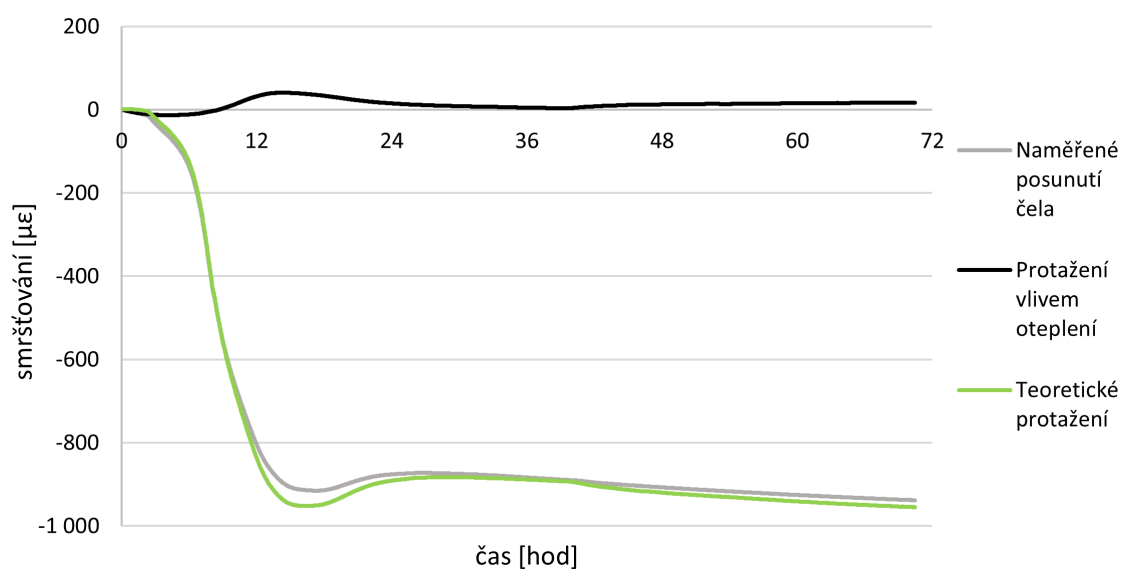


Obr. A.2 Smršťování tělesa A2 ve žlabu

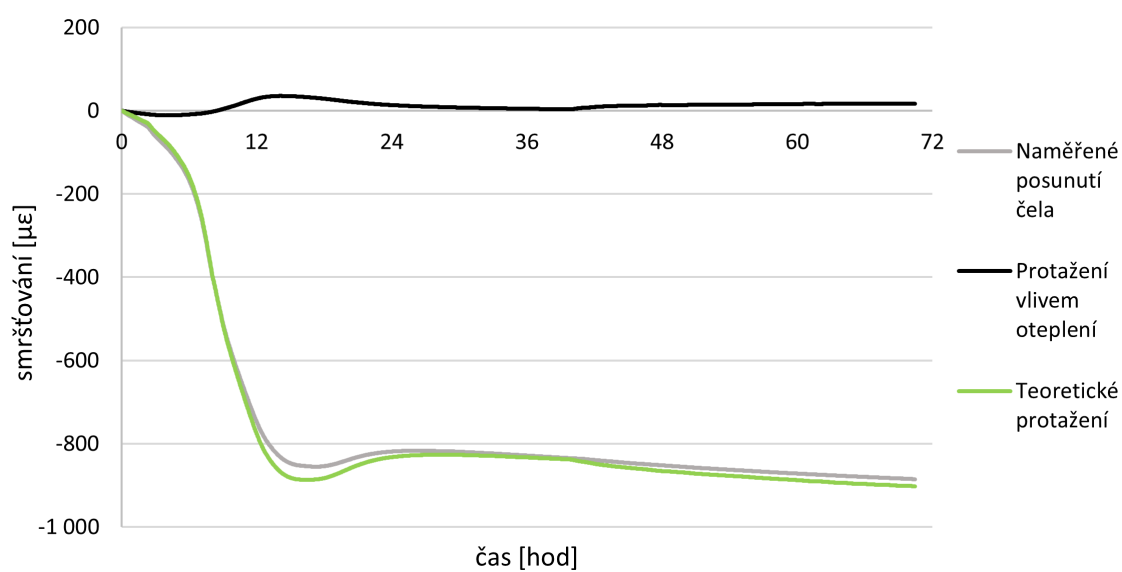


Obr. A.3 Smršťování tělesa A3 ve žlabu

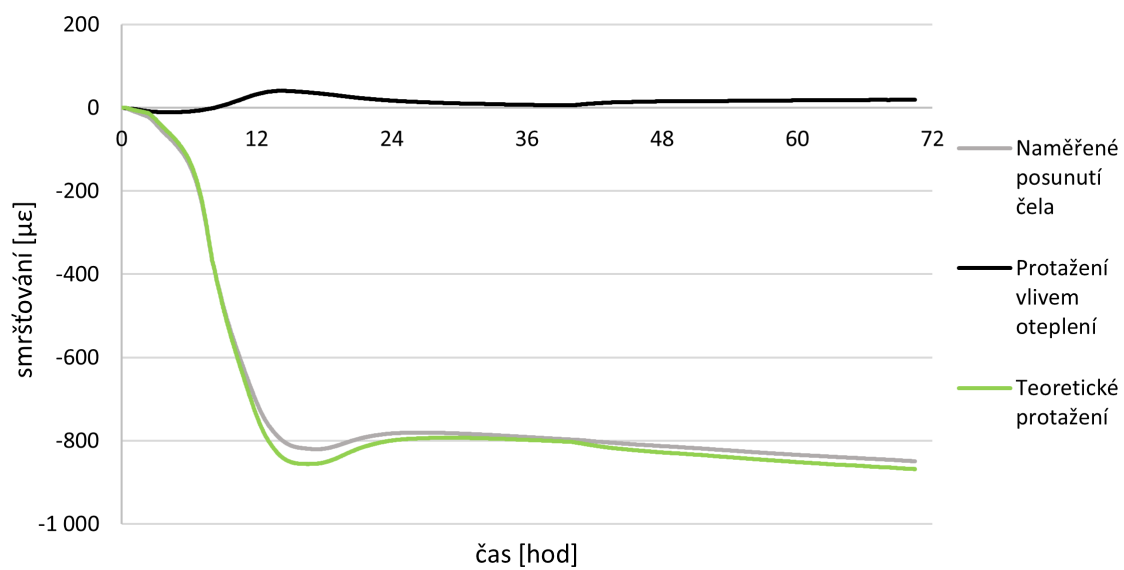
A.2 Sada C



Obr. A.4 Smršťování tělesa C1 ve žlabu



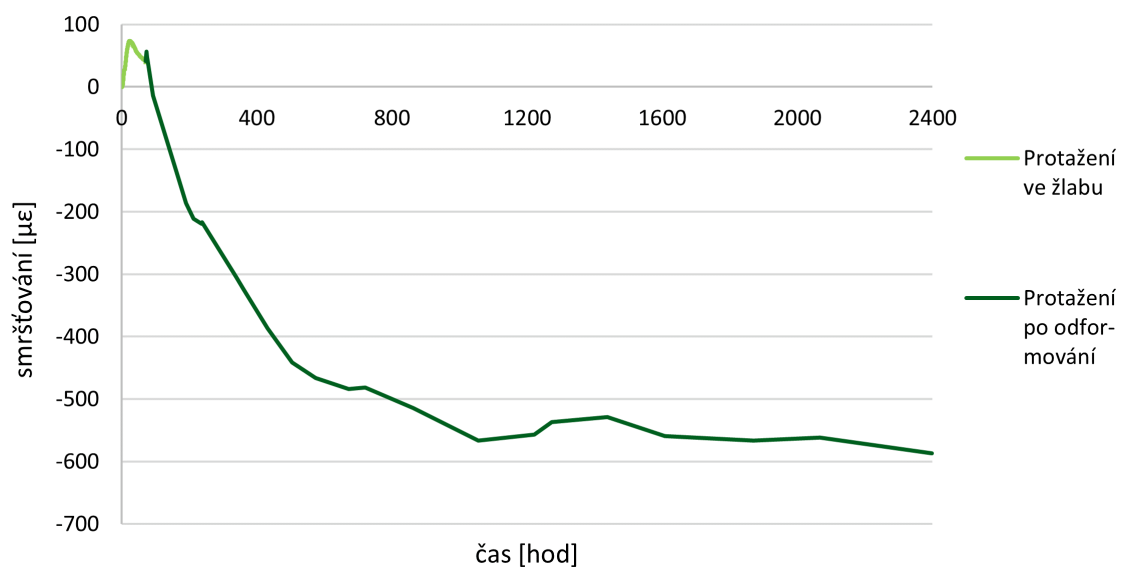
Obr. A.5 Smršťování tělesa C2 ve žlabu



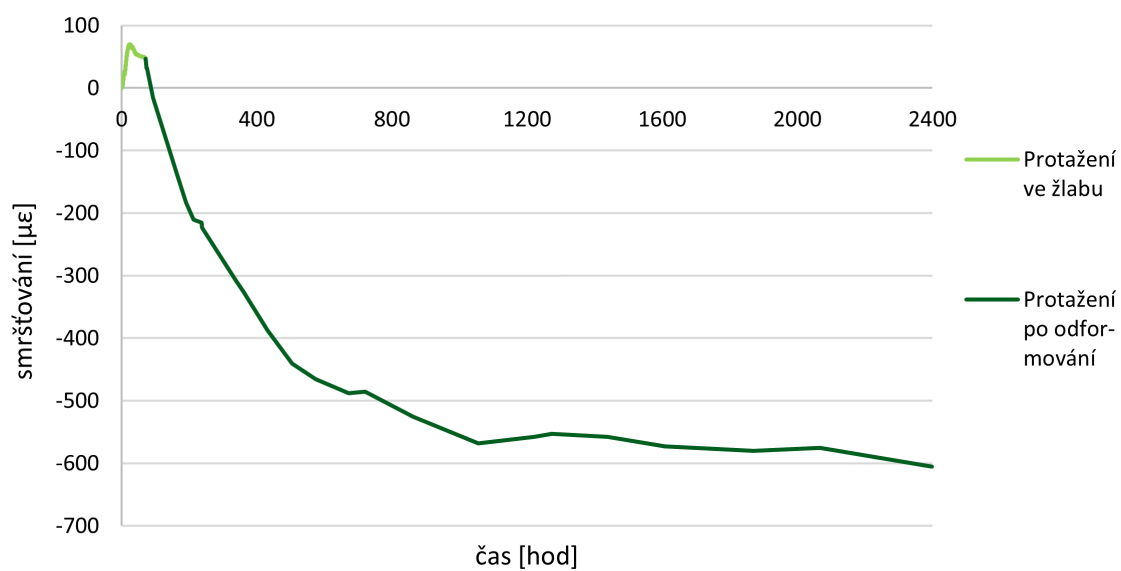
Obr. A.6 Smršťování tělesa C3 ve žlabu

B PROTAŽENÍ PO ODFORMOVÁNÍ

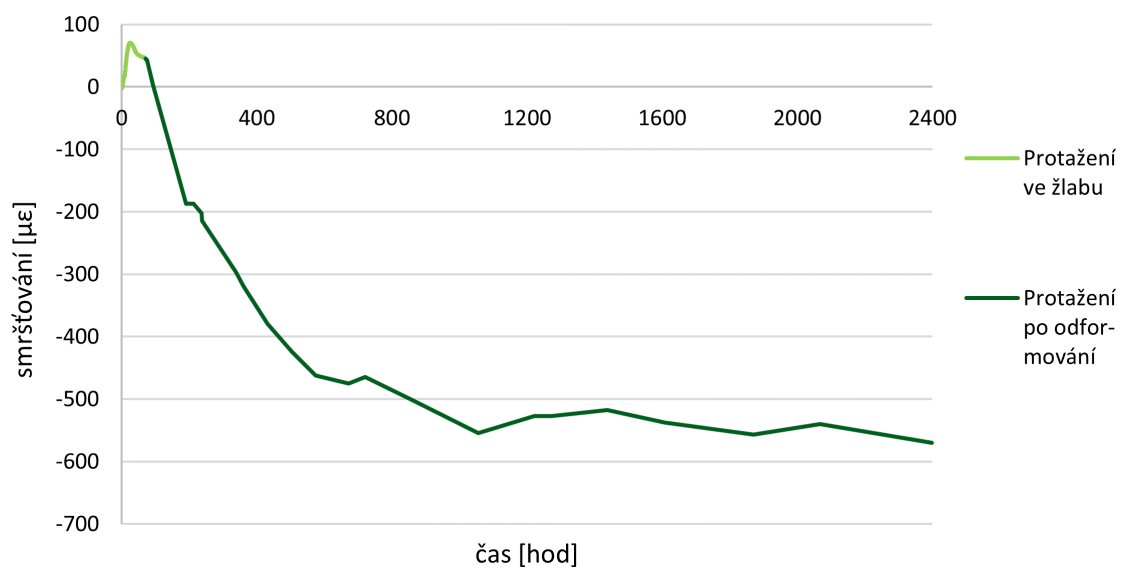
B.1 Sada A



Obr. B.1 Smršťování tělesa A1 po odformování

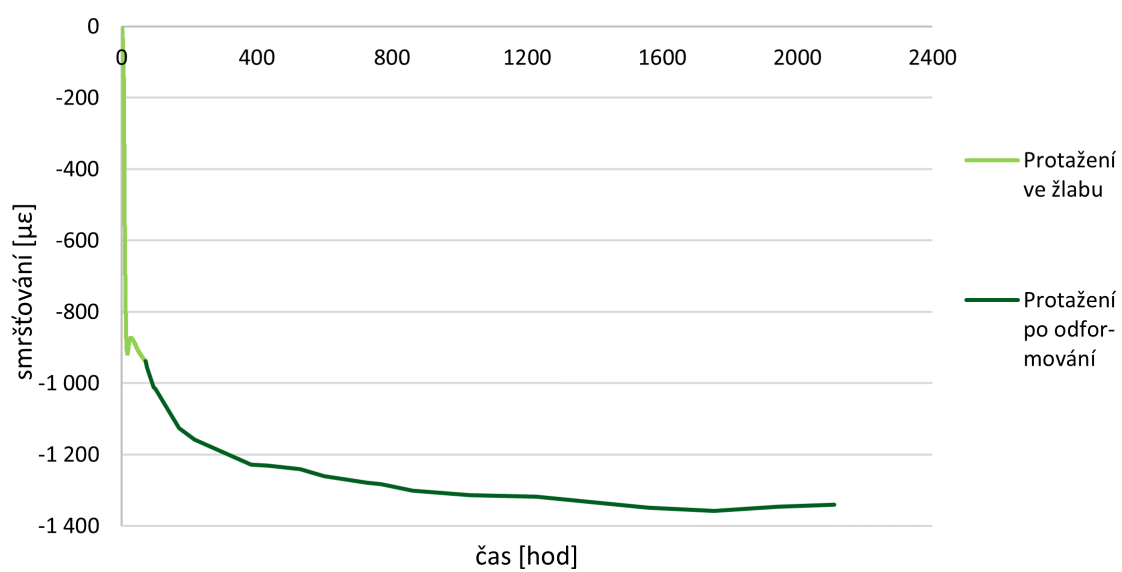


Obr. B.2 Smršťování tělesa A2 po odformování

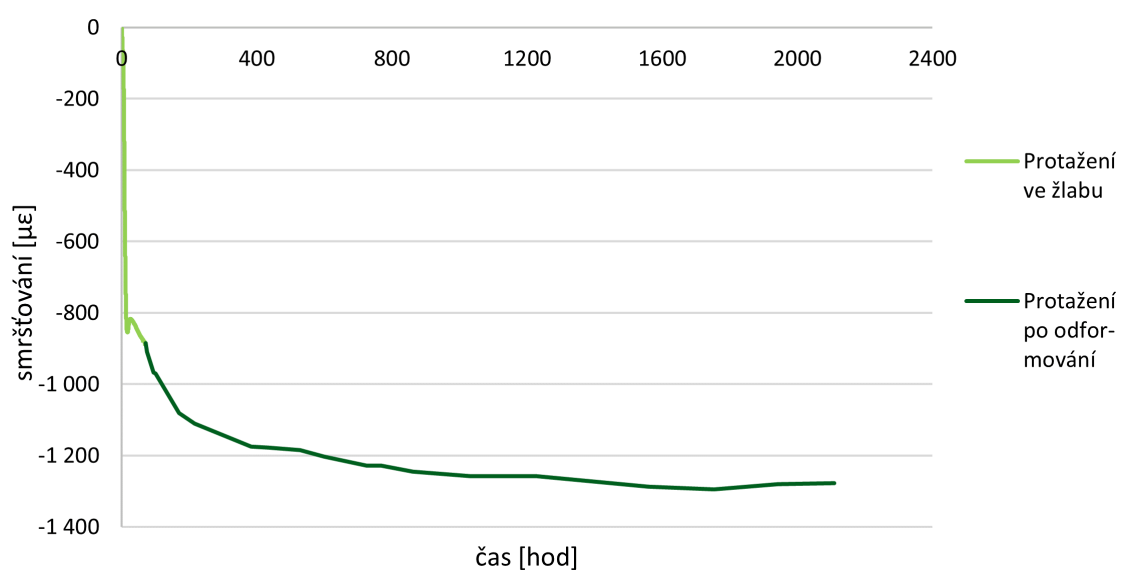


Obr. B.3 Smršťování tělesa A3 po odformování

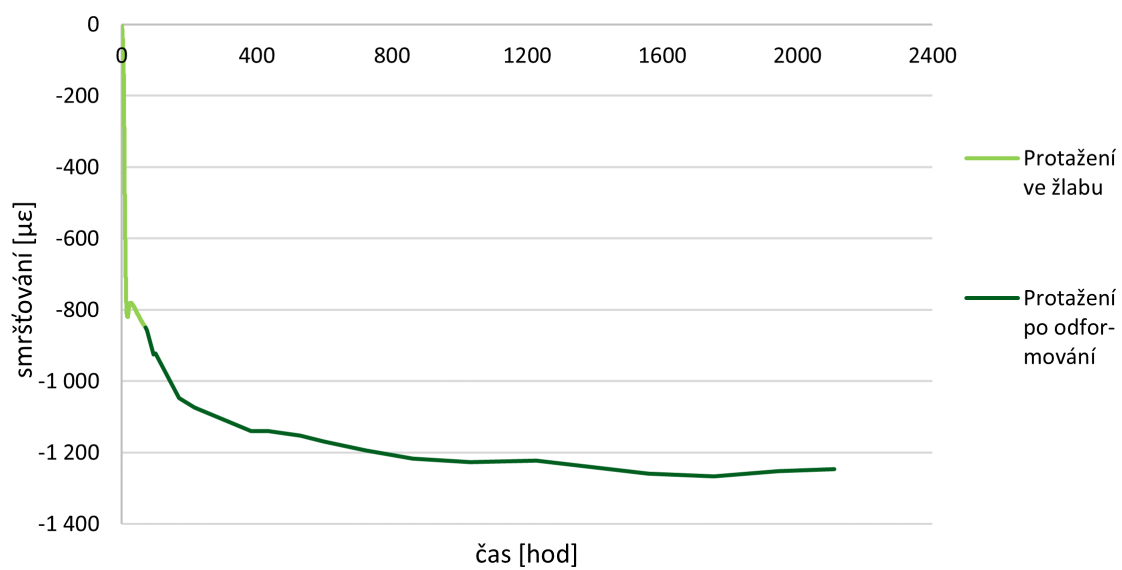
B.2 Sada C



Obr. B.4 Smršťování tělesa C1 po odformování



Obr. B.5 Smršťování tělesa C2 po odformování



Obr. B.6 Smršťování tělesa C3 po odformování